28

Reensamblaje de los continentes

La latitud es bastante incierta, y también la longitud es vaga.

William Jeffrey Prowse (1836-1870).

Cambios en la concepción de las relaciones entre continentes y océanos

Los continentes consisten esencialmente en delgadas costras de sial, que se distribuyen formando un par septentrional, conocido en conjunto con el nombre de *Laurasia* y un grupo meridional más disperso que recibe la denominación colectiva de *Gondwanalandia*. La periferia exterior de los miembros de cada uno de estos grupos está definida por las zonas orogénicas alpinas (figs. 28.1 y 28.2) y las costas, generalmente respaldadas por montañas, son de tipo pacífico (fig. 23.4). Las márgenes internas de los miembros de cada grupo que dan frente a los oceános Ártico, Atlántico e Índico están fracturadas, y en muchos lugares sus costas son de tipo atlántico (fig. 23.4).

La medida en que estas unidades primarias y su disposición hayan sido o no estables a través de los tiempos geológicos ha constituido uno de los problemas fundamentales de geología. Durante cerca de un siglo hubo un acalorado debate respecto a si los continentes y los oceános podían intercambiarse como resultado de movimientos verticales o radiales. Durante el último siglo se asumió tácitamente que, si se tenían que postular intercambios entre continente y oceáno, entonces los movimientos implicados difícilmente podían ser de otro tipo más que verticales, exceptuando los débiles movimientos laterales en la corteza de una tierra supuestamente en contracción.

La existencia generalizada de sedimentos marinos en tierra sugería que los continentes podían bajar a profundidades oceánicas y los fondos oceánicos subir hasta convertirse en tierra seca. Sin embargo, gradualmente se fue reconociendo que, con pocas excepciones menores, estos depósitos probaban que sólo se trataba de inundaciones temporales de tierra por mares someros. Por esta razón, entre otras, Dana en 1846 expresó el punto de vista de que continentes y océanos nunca habían cambiado de lugar, y que la configuración general de la tierra se había mantenido esencialmente estable. No obstante, Edward Forbes, en el mismo año, considerando el problema desde el punto de vista biológico, estimó imposible explicar cómo ciertos animales y plantas pudieron emigrar de un continente a otro sin que algunas regiones de los oceános estuvieran primitivamente en seco. De este modo comenzó la larga controversia referente a la estabilidad de los continentes y las cuencas oceánicas.

La justificación en pro de la estabilidad se encontró en el hecho de que los sedimentos de mar profundo, análogos a los que actualmente se forman en el fondo de los océanos, se han descubierto sólo en unas pocas islas marginales donde podían explicarse por movimientos verticales implicados en la formación de montañas. Además, con la creciente identificación de la isostasia y sus implicaciones cada vez resultó más difícil imaginar un proceso que pudiera convertir el fondo oceánico en tierra o la tierra seca en fondo oceánico. Esta dificultad se convirtió en imposibilidad cuando la exploración sísmica reveló la ausencia de sial de los fondos oceánicos. Desde luego, se podía contar con el volcanismo para construir puentes intercontinentales como Panamá, que une América

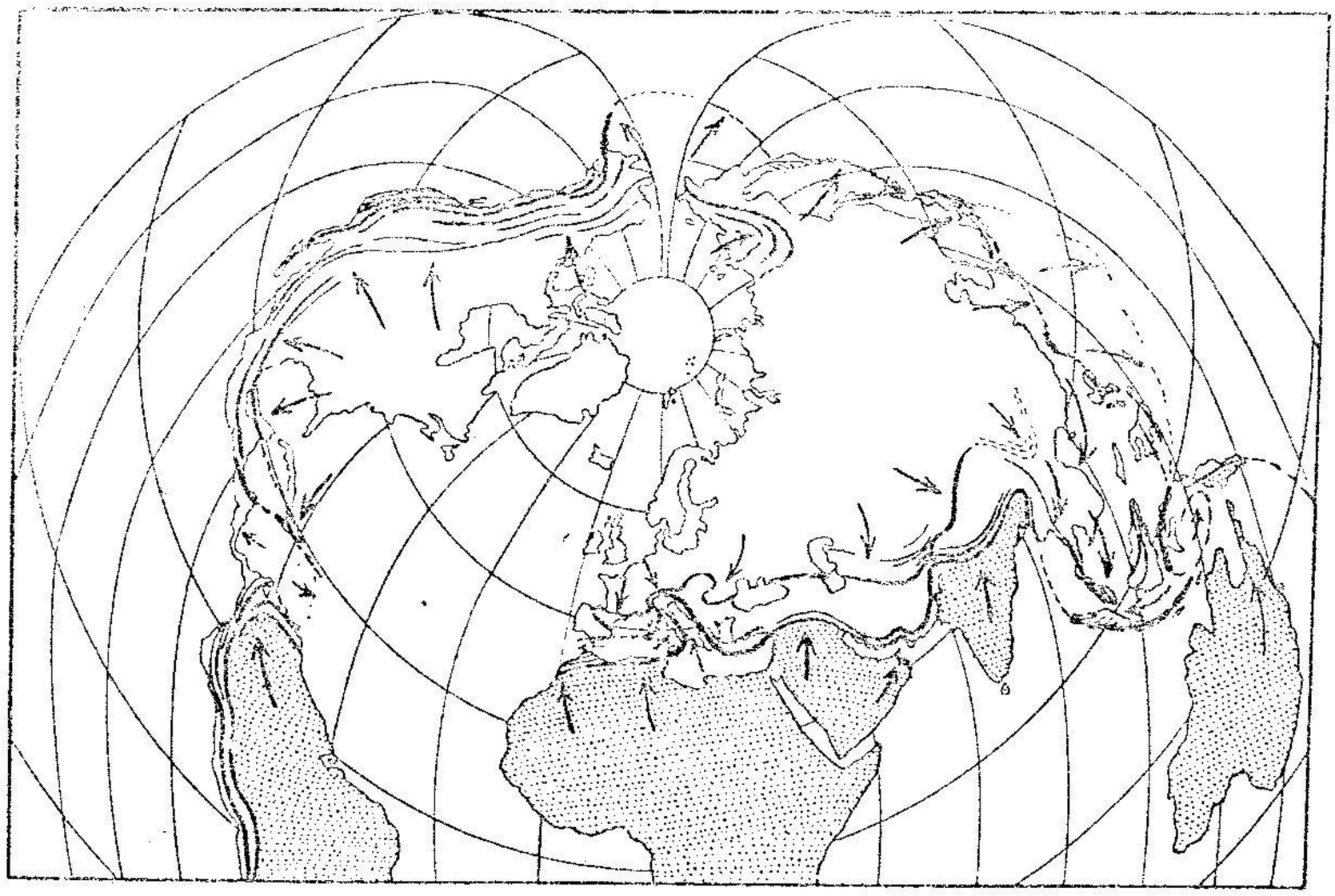


Figura 28.1. Mapa que muestra el anillo orogénico interrumpido, periférico respecto de las masas continentales de Laurasia (en blanco). Los supuestos movimientos de los continentes dirigidos hacia fuera, hacia el Pacífico y el Tethys, se indican mediante flechas.

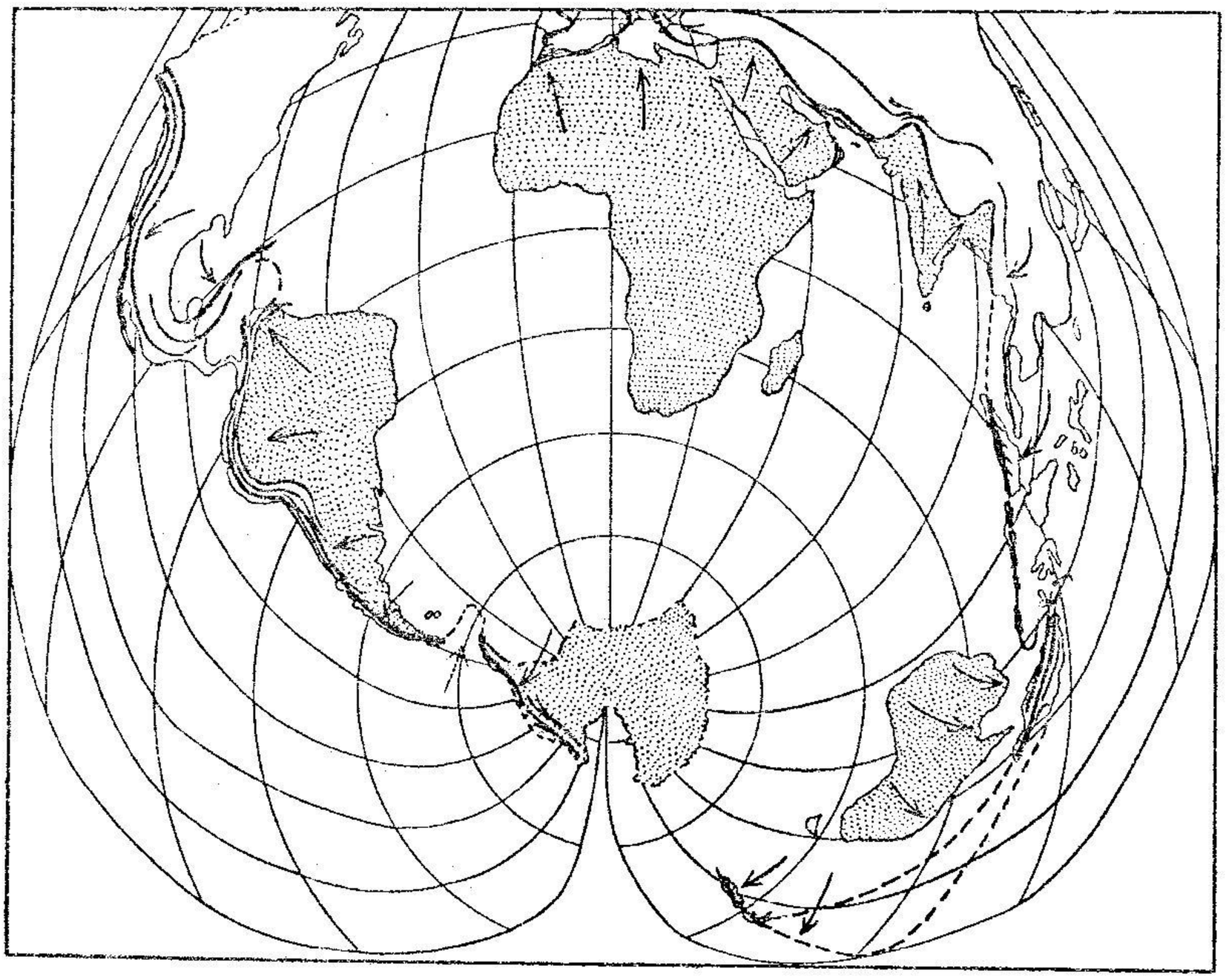


Figura 28.2. Mapa del anillo orogénico interrumpido, periférico respecto de las masas continentales de Gondwanalandia (en punteado). Las flechas indican movimientos supuestos de los continentes hacia el Pacífico y el Tethys.

del Norte y del Sur, o islas de paso como las de las Antillas, que también unen las Américas para muchos propósitos biológicos. Sin embargo, quedaba el problema principal y hace sólo unas cuantas décadas todavía se inventaban hipotéticos puentes intercontinentales a una escala de lo más irresponsable para proporcionar a los biólogos las rutas migratorias que requerían para explicar dispersión de animales terrestres que no podían soportar un ambiente marino, o la de habitantes del fondo de aguas someras que no podían cruzar el fondo de un océano.

Otro problema lo planteó la evidencia de que ciertas regiones que proporcionaban sedimentos detríticos a formaciones bien conocidas —regiones que, por consiguiente, tenían que haber sido continentales— habían desaparecido, y su lugar habría sido ocupado por océanos de alta mar, con

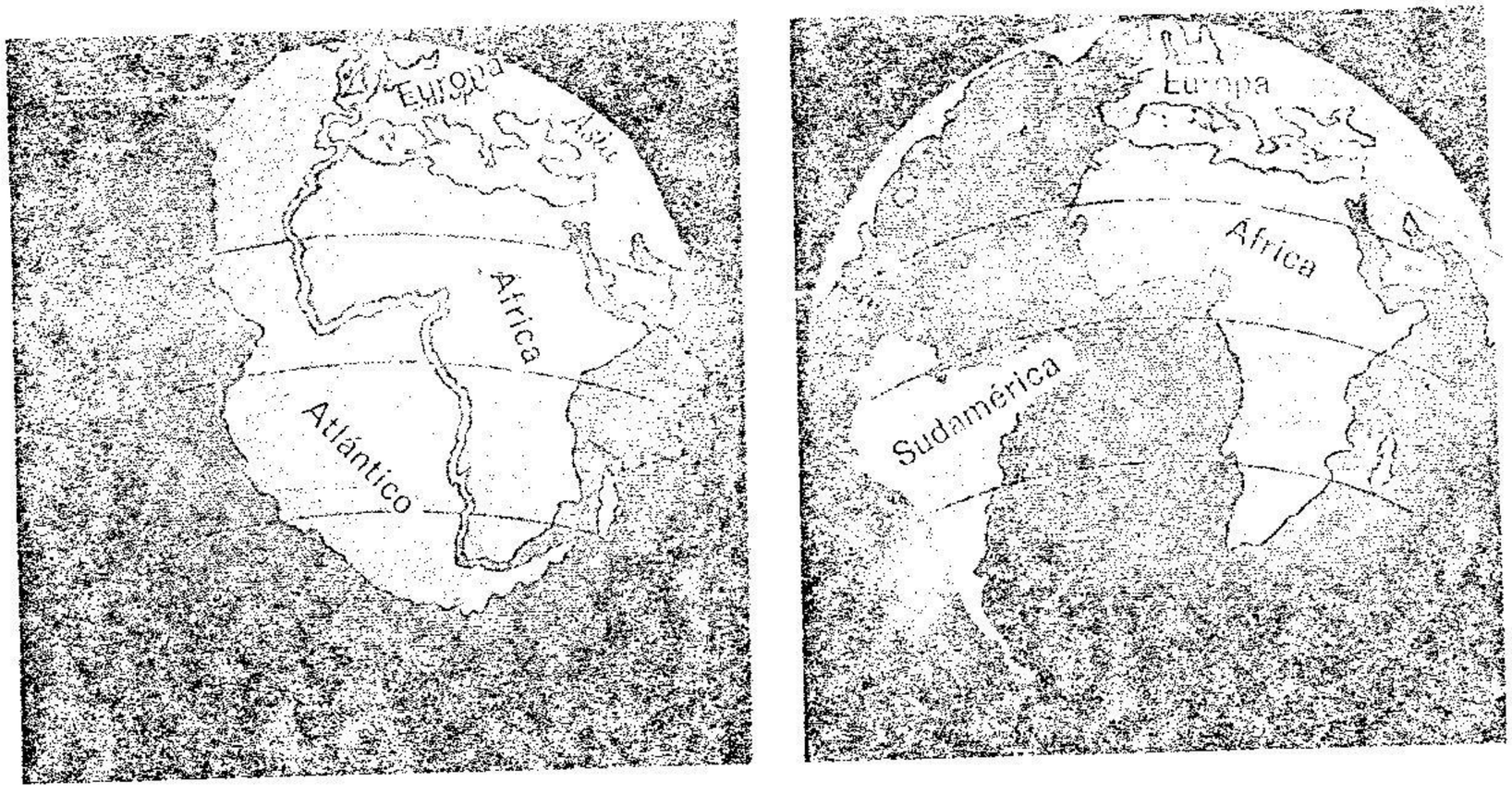


Figura 28.3. Mapas publicados por A. Snider en 1858 que representan su concepción de la deriva continental. El mapa de la izquierda representa su reconstrucción de los continentes para fines del Carbonífero.

fondos, de los que ahora se sabe que son de tipo oceánico típico, que empezarían cerca de las costas actuales. ¿Qué ha ocurrido, entonces, con las tierras desaparecidas?

La sugerencia de que podía haber habido desplazamientos laterales de las masas continentales a una escala gigantesca se atribuye generalmente a F. B. Taylor, de Norteamérica (1908), y Alfred Wegener, de Alemania (1910). Durante muchos años, estos precursores desarrollaron sus poco ortodoxas hipótesis con bastante independencia entre sí. Sin embargo, en realidad, el germen de la idea se remonta a 1620, cuando a Francis Bacon le impresionó tanto el paralelismo de las costas opuestas del Atlántico como para especular sobre su significado. Pero no fue tan lejos como un francés, un tal P. Placet, quien en 1668 publicó una obra fantástica titulada *La corruption du grand et du petit monde, où il est montré que devant le déluge, l'Amérique n'était point séparée des autres parties du monde*. Casi dos siglos después, Antonio Snider unió los continentes de modo muy parecido al de Wegener. En un libro titulado con optimismo *La Création et ses Mystères dévoilés* (París, 1858) publicó los dos mapas que reproduce la figura 28.3. La reconstrucción de la geografía del Carbonífero de Snider intentaba explicar el hecho de que la mayor parte de las plantas fósiles conservadas en los yacimientos carboníferos de Europa eran idénticas a las de los yacimientos norteamericanos. Aunque los dos diagramas vuelven a publicarse en la popular y entretenida obra de J. H. Pepper, *Playbood of Metals* (Londres, 1861), la idea que ellos implican fue evidentemente considerada como demasiado fantástica y disparatada para ser digna de atención científica seria. Para cualquier fin práctico rápidamente fue olvidada.

Concepto de Taylor de la deriva continental

Hasta que Wegener publicó su famoso libro sobre este tema en 1915, no hubo posibilidad de que la deriva continental comenzara a ser discutida de forma generalizada. Pero debemos conceder a Taylor el honor de haber efectuado una primera salida independiente y en cierto modo inicial en tan precario campo. En un panfleto impreso a título privado en 1908 describió los continentes como «inmensos desprendimientos de las regiones polares hacia el ecuador», pero no publicó sus ideas hasta 1910. Su objetivo inmediato era explicar la distribución de las cadenas montañosas. Imaginó la primitiva Laurasia como una lámina continua de sial, y supuso que se había extendido superficialmente hacia el ecuador, más o menos radialmente desde las regiones polares, igual que hubiera hecho un manto de hielo continental. Allí donde la resistencia fue menor, la corteza se fue extendiendo en lóbulos, elevándose festones y arcos montañosos en el frente (cf. figs. 28.1). Tales movimientos, como es natural, hubiesen sido imposibles sin el estiramiento y fragmentación complementarios operados en la retaguardia. Y, realmente, se encuentran numerosas pruebas de fallas y dislocaciones en las islas y tierras costeras del Ártico y del Atlántico Norte, y especialmente en la región tan fracturada comprendida entre Groenlandia y Canadá, cuyo mapa parece un rompecabezas de marquetería con los fragmentos separa-

dos. En el hemisferio meridional, el continente de Gondwana, originariamente continuo, se extendió de un modo similar, rompiéndose en numerosas balsas que emigraron también hacia el ecuador y levantaron montañas en su frente de avance (figura 28.2). Las cuencas de los océanos Atlántico Sur e Índico fueron interpretadas como regiones estiradas y rotas dejadas detrás o entre estos continentes a la deriva.

Dos fueron las razones de que la hipótesis de Taylor recibiera escasa atención. Ya se contaba con que en las estructuras de los sistemas orogénicos estaba implicada una cantidad considerable de movimiento lateral continental, pero parecía innecesariamente extravagante invocar miles de kilómetros de desplazamiento horizontal cuando, de acuerdo con la hipótesis de la contracción, serían suficientes 30 a 70 km. En segundo lugar, el intento de Taylor de explicar los pretendidos movimientos fue bastante inaceptable. Suponía que la luna se convirtió en satélite de la tierra durante el Cretácico y que durante la época de su captura estuvo mucho más cerca de la tierra que en la actualidad. Supuso que las fuerzas de marea resultantes fueron lo suficientemente poderosas, no solamente para modificar la velocidad de rotación de la tierra, sino también para arrastrar los continentes alejándolos de los polos.

Aparte la improbabilidad de que la tierra careciese de satélite hasta el Cretácico, hay dos objeciones fatales a esta suposición:

(*a*) Si la elevación de las montañas durante el Cretácico superior y el Terciario tuviese que correlacionarse con la supuesta aproximación y captura de la luna, entonces es evidente que quedarían sin explicación los ciclos orogénicos anteriores.

(*b*) Si la fuerza de las mareas aplicada a la tierra por la luna recientemente capturada hubiese sido suficiente como para desplazar continentes y elevar montañas a la escala requerida, entonces, como Jeffreys ha mostrado convincentemente, la fricción producida hubiera actuado a modo de freno gigantesco y la rotación hubiera llegado a pararse antes de transcurrido un año.

La «explicación» de Taylor es insostenible, pero de la crítica se puede sacar una conclusión muy importante. El hecho de que continuara la rotación de la tierra demuestra que ni la fricción de la marea ni ninguna otra clase de fuerza aplicada desde fuera de nuestro planeta puede ser causante del levantamiento de las montañas o de la deriva continental. Sea cual sea la causa primaria de ello, ésta debe buscarse *en* la la propia tierra.

Concepto de Wegener de la deriva continental

Se tiende a suponer que la semilla destinada a desarrollarse, hasta convertirse en el gran concepto de la deriva continental pudo implantarse en la mente de Wegener durante su primera expedición a Groenlandia en 1906-1908. Seguro que, frente a la costa NE, no pudieron pasarle inadvertidas ni la fragmentación en témpanos gigantescos del gran paquete de hielo polar, formando debajo marejadas ondulantes, ni la formación de bandas o vías de paso en el mar cuando las corrientes o los vientos separaban algunos de los témpanos adyacentes. Sin embargo, parece que la inspiración consciente de la idea análoga del alejamiento de África y Sudamérica no le llegó hasta la Navidad de 1910, cuando tuvo una oportunidad para examinar con tiempo los bellos mapas del *Handatlas* de André. El casi paralelismo de las costas opuestas del Atlántico Sur inmediatamente inflamó su imaginación. A pesar de los riesgos de las iras que iba a desatar, casi inmediatamente anunció su hipótesis de los «continentes en movimiento» en una reunión de geólogos alemanes. Su reacción hostil anunció la enconada controversia internacional que siguió a la publicación en 1912 de las primeras comunicaciones de Wegener sobre el tema.

El concepto sumamente ingenioso de Wegener sobre la evolución de los continentes y su distribución se ilustra gráficamente en sus propios mapas, tan extraños y fantásticos al darse a conocer por vez primera, pero ahora tan conocidos de todos (fig. 28.4). Su representación del mundo de la época carbonífera es algo similar a la de Snider, excepto en que la India y la Antártida están albergadas entre Australia y África, con el cuerno de Sudamérica curvándose alrededor de la Antártida occidental. Para designar esta combinación de Laurasia y Gondwanalandia, que incluía toda la tierra seca del globo, Wegener propuso el nombre de *Pangea* (del griego, toda la tierra). Snider pretendía que los bosques que dieron los yaci-

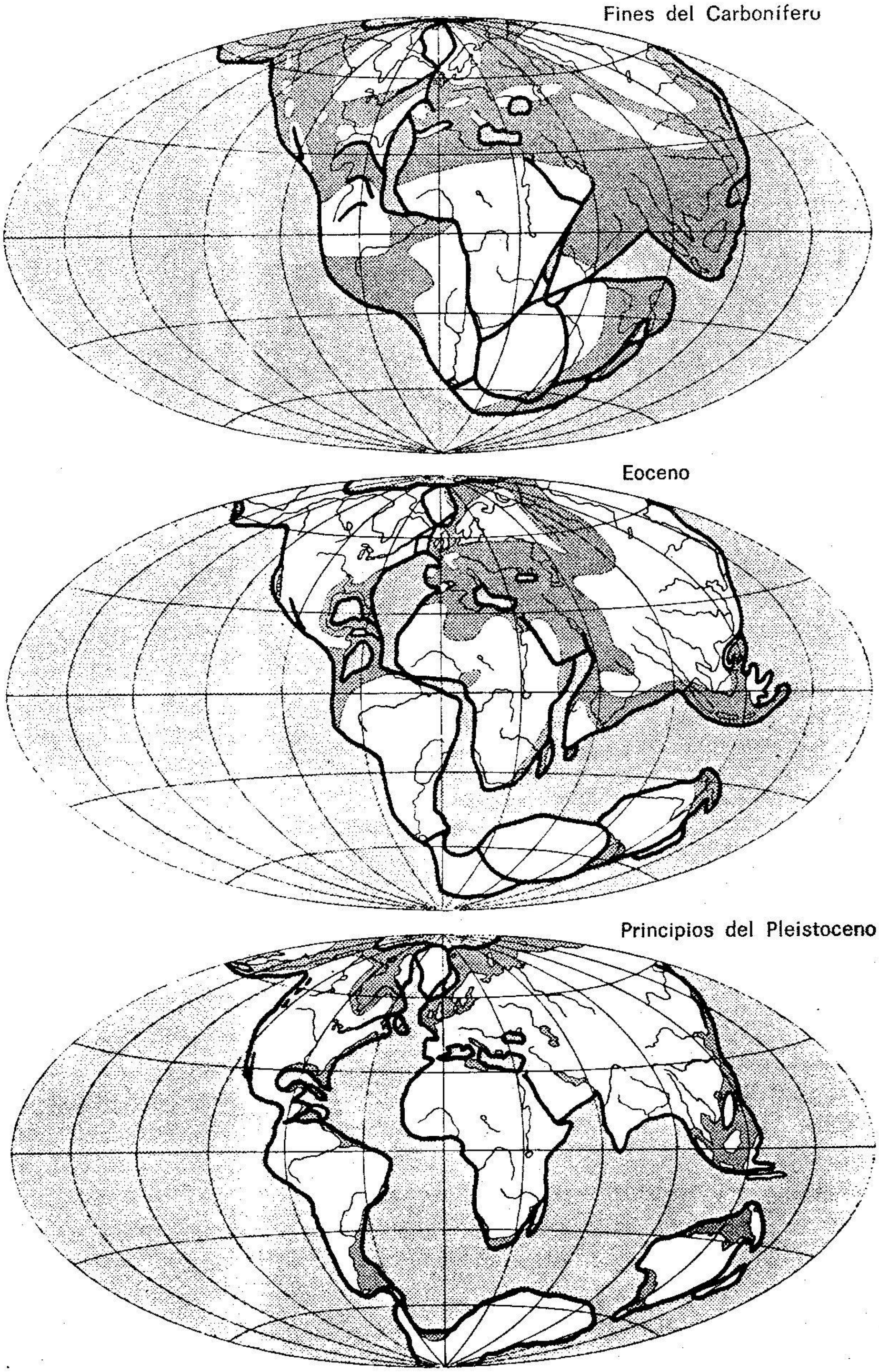


Figura 28.4. Reconstrucción de Wegener de la distribución de los continentes durante los períodos indicados. África se sitúa en su posición actual para servir como estándar de referencia. Las zonas de sombreado más denso (principalmente sobre los continentes) representan mares someros (*Según A. Wegener, Die Entstehung der Kontinente und Ozeane*, 1915).

mientos de carbón eran tropicales y que, en consecuencia, Europa y Norteamérica debían de hallarse entonces cerca del ecuador, lo que implicaría que Sudáfrica debía de hallarse cerca del polo sur. Análogamente, pero debido a la distribución de las glaciaciones carbonífero-pérmicas, Wegener dedujo que el polo sur del Carbonífero ocupaba una posición exactamente enfrente de la costa actual de Sudáfrica (fig. 28.5).

La actual distribución de los continentes fue considerada como resultado de la fragmentación por grietas, seguida de la separación y deriva de las masas individuales. Los continentes meridionales comenzaron a despegarse durante la era me-

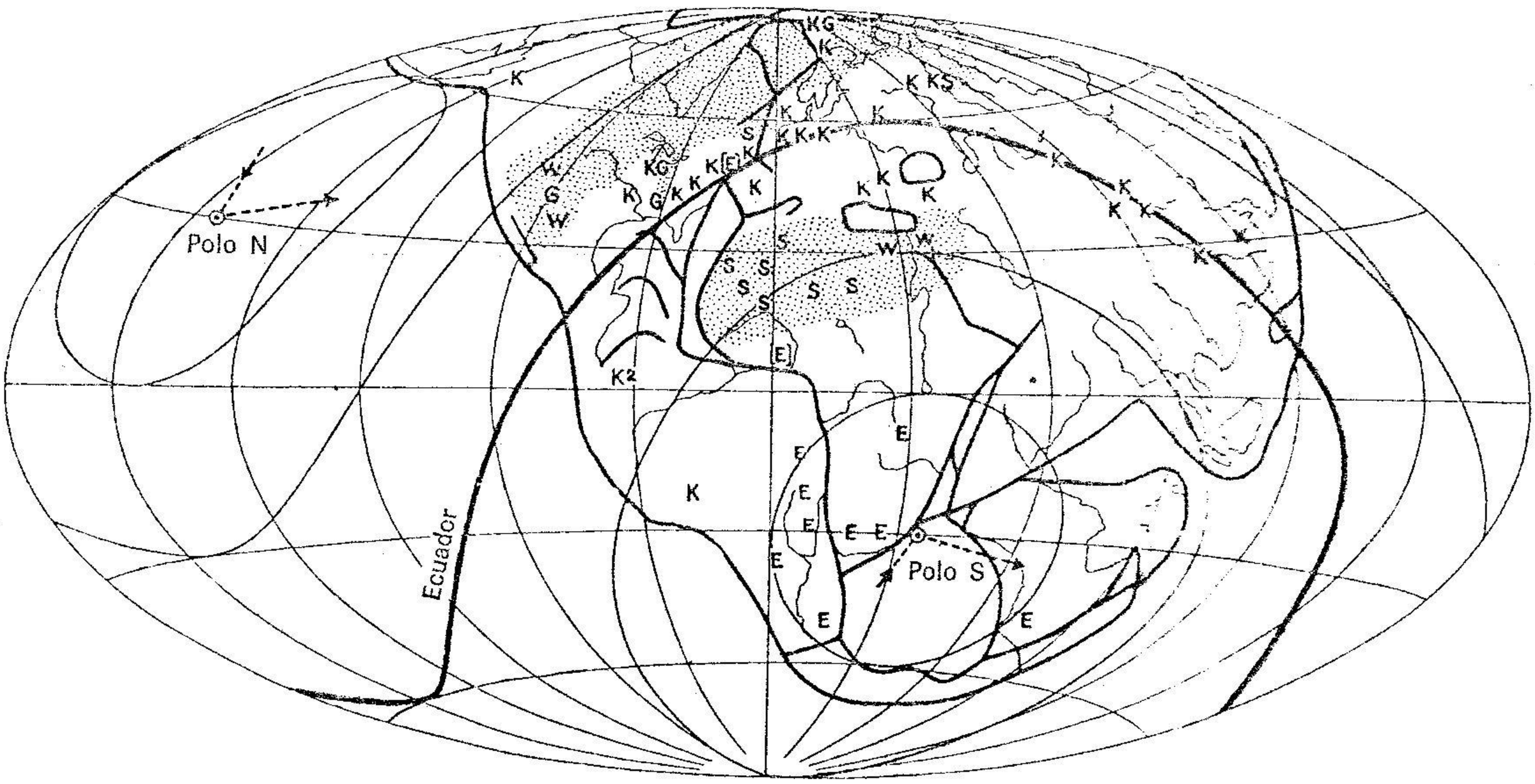


Figura 28.5. Reensamblaje de los continentes para fines del Carbonífero, basado en las pruebas paleoclimáticas disponibles en 1924. Las regiones afectadas por glaciación están indicadas por E (Eis, hielo). K muestra la distribución de carbón, principalmente cerca del ecuador, de la época (línea continua). Las regiones punteadas a ambos lados del ecuador carbonífero eran regiones áridas: W, arenisca del desierto; S, sal y G, yeso. El polo sur se sitúa cerca de Durban y el polo norte, en el Pacífico, al nordeste de Hawaii. Debe notarse que la (E) del ecuador cerca de Boston, Massachussetts (la tillita de Squantum), de edad dudosa en 1924, se adscribe actualmente al Paleozoico inferior (*Según W. Köppen y A. Wegener, Die Klimate der geologischen Vorzeit,* 1924).

sozoica, siendo alejados del polo sur fuera cual fuese la posición que éste ocupase en un momento dado durante el progreso de los movimientos centrífugos. Algo más tarde, Norteamérica comenzó a desprenderse y a derivar hacia el oeste, y Groenlandia fue la última en hacerlo. El Atlántico es la inmensa brecha dejada a popa y rellenada hasta un nivel apropiado por el flujo de sima procedente del manto. Cuando los continentes alcanzaron sus posiciones actuales, había embarrancado la Antártida en el mismo polo sur; África quedó atravesada por el ecuador; la India quedó estrechamente unida a Asia, penetrando en ella a modo de cuña, y Australia y Nueva Guinea se habían adentrado en el Pacífico dejando atrás el arco de Banda y llegando a separarlo de los arcos del Pacífico.

La deriva de los continentes, alejándose de los polos, fue apasionadamente descrita por Wegener como el *Polflucht*: la huida desde los polos. Atribuyó la fuerza implicada a la atracción gravitacional ejercida por el abultamiento ecuatorial de la tierra. Esta atracción existe en realidad, pero es una fuerza muchos millones de veces demasiado débil para arrancar los continentes de su lugar de anclaje.

Wegener también postuló una deriva general hacia el oeste. Supuso que al moverse las dos Américas hacia el oeste, chocando contra la resistencia del fondo del Pacífico, su parte frontal o de proa se arrugó formando una gran cadena de montañas. Entre las dos inmensas balsas un reguero de fragmentos que fueron quedando rezagados son los que formaron las islas de las Antillas. De un modo análogo quedó rezagado el prolongado istmo que unía América del Sur con la Antártida, formando el apéndice a modo de cuerno de ambos continentes y el reguero de salpicaduras de sial que se conservan bajo la forma de guirnalda de islas que constituyen las Antillas meridionales. Los pretendidos efectos de la deriva desde el oeste de Asia están menos afortunadamente concebidos. Las grandes profundidades oceánicas las consideró como desgarraduras abiertas al ensancharse las grietas existentes en el fondo del Pacífico y que todavía no se han cicatrizado completo, mien-

tras que las guirnaldas de islas las interpretó como bandas de sial que quedaron unidas al continente sólo en sus extremos.

Los movimientos hacia el oeste fueron atribuidos a las atracciones diferenciales de la luna y del sol sobre los continentes. El rozamiento debido a las mareas actúa a modo de freno sobre la rotación terrestre, y como su efecto sobre las protuberancias es mayor que sobre los niveles más bajos de la corteza, los continentes tienden a quedar rezagados. Si éstos realmente *quedaran* retrasados, la apariencia sería de derivar hacia el oeste. Mas aquí, también, la fuerza invocada es irremediablemente inadecuada para vencer la enorme resistencia que opone el movimiento real. La fuerza de las mareas afecta muy poco a la rotación terrestre y en realidad es diez mil millones de veces más pequeña de lo que haría falta para trasladar los continentes y producir el levantamiento de montañas.

En apoyo de su exposición relativa a la deriva de los continentes, Wegener fue barajando una importante colección de hechos y opiniones. Es innegable que algunas de sus pruebas son convincentes, en especial la distribución de las glaciaciones carbonífero-pérmicas, ya discutidas en la página 517. Pero entre sus defensas hubo tantas que se basaron en datos inadecuados y especulaciones que suscitaron una tempestad de críticas adversas. Era demasiado fácil demoler algunos de los puntos de vista particulares de Wegener. Además, siguiendo a muchos geofísicos influyentes, la mayoría de los geólogos se mostraron refractarios a admitir la posibilidad de la deriva continental, porque ninguno de los procesos naturales conocidos parecía tener la más remota posibilidad de llevarla a cabo. Tanto la «huida de los polos» como la deriva desde el oeste a causa de la marea han sido descartadas como factores eficaces permanentemente. Originariamente la migración polar a una escala de importancia geológica pareció imposible, pero ha llegado a ser dinámicamente respetable y en lo sucesivo se puede tomar en consideración en tanto en cuanto resulte necesaria. La deriva continental, que actualmente abarca la separación cortical y la expansión y renovación del fondo oceánico, se sabe que está actuando en nuestros días. Y los geofísicos no sólo han quedado convencidos por el testimonio del paleomagnetismo sino que se han puesto al frente con el concepto de *tectónica de placas* (pág. 714).

Criterios geológicos para la deriva continental

Los principales criterios geológicos relativos a la deriva continental se basan en las consideraciones siguientes:

(*a*) Si los continentes ocuparon anteriormente posiciones muy diferentes sobre la superficie terrestre, entonces la distribución de zonas climáticas, deducida de pruebas geológicas, debe haberse modificado consecuentemente. En capítulos anteriores ya se han resumido amplias evidencias de tales cambios: por ejemplo, al tratar de las glaciaciones carbonífero-pérmicas (pág. 514); de la arena del desierto y la dirección de los vientos (página 547); de la distribución de depósitos de sal (pág. 550), y de los arrecifes coralinos antiguos (pág. 628).

(*b*) Si dos continentes, en la actualidad considerablemente alejados, estuvieron originalmente unidos, sería posible descubrir este hecho mediante el reconocimiento de ciertos rasgos geológicos que antes fueron compartidos en común, por ejemplo: las zonas orogénicas cuyos extremos truncados pueden hacerse encajar naturalmente; detalles y secuencias específicos y raros de la historia geológica tal como la revelan las rocas sedimentarias y de otro tipo de las tierras separadas, y la identidad de los restos fósiles de animales y plantas (especialmente los de especies terrestres y de agua dulce) que pudieron emigrar libremente a través de continentes unidos, pero no de un océano intermedio.

(*c*) Indicios aportados por fallas de desgarre (transformantes), como la de San Andrés, con desplazamientos laterales acumulativos que a veces alcanzan centenares de kilómetros, de que desde hace mucho han estado actuando movimientos que implican deriva continental.

Finalmente, y por encima de todo, está la evidencia geofísica que ha aportado las pruebas de la deriva continental. A partir de rocas que pueden considerarse brújulas paleomagnéticas, ya que han retenido un registro de las posiciones de los polos tal como estaban cuando ellas se formaron, queda probado por encima de toda duda que en períodos geológicos pasados los continentes ocupaban posi-

ciones muy diferentes de las actuales, tanto con respecto a los polos como unos respecto a otros (págs. 678-84).

Los continentes opuestos del Atlántico

Desde que Wegener imaginó el Atlántico como un enorme valle de fractura en proceso de ensanchamiento, con bordes todavía encajando «tan minuciosamente como las líneas de un dibujo roto se corresponderían si los trozos se yuxtapusieran», nunca se ha dejado de discutir el paralelismo de sus orillas opuestas. La figura 28.6 muestra el resultado de una comparación directa y precisa hecha en 1958 por Carey entre Sudamérica y África, no a lo largo de las actuales costas, modificadas por erosión marina y deposición, sino en alta mar a una profundidad de 200 m, o sea hacia la parte superior del talud continental. Carey hizo esta comparación deslizando casquetes transparentes sobre la superficie del globo hasta que consiguió el mejor encaje. Una comparación similar a una profundidad de 2000 m, o sea más o menos en la zona media del talud continental, es quizá ligeramente mejor. Posteriormente, Bullard (1964) metió todos los datos importantes en un computador al que se pidió que hallara el nivel de «encaje» más perfecto y obtuvo como respuesta una profundidad intermedia entre ambas. El «encaje» entre los continentes opuestos del Atlántico se representa en la figura 28:7, preparada por Carey (1958) para su Simposio sobre Deriva Continental, que tanto hizo por reavivar el interés por el tema. Sobre este «encaje» Carey escribió: «Así, la costa este de Norteamérica es el molde del gran abultamiento occidental de África (AA′), el golfo de Guinea es el negativo de la prominencia de Brasil (BB′) y el entrante de la plataforma sudamericana hasta las islas Malvinas es el molde del cabo de Buena Esperanza y de la mayor parte de Sudáfrica (CC′)».

Figura 28.6. Comparación de África y Sudamérica por yuxtaposición de las isóbatas de 200 m (profundidad bajo el nivel del mar) *(S. Warren Carey).*

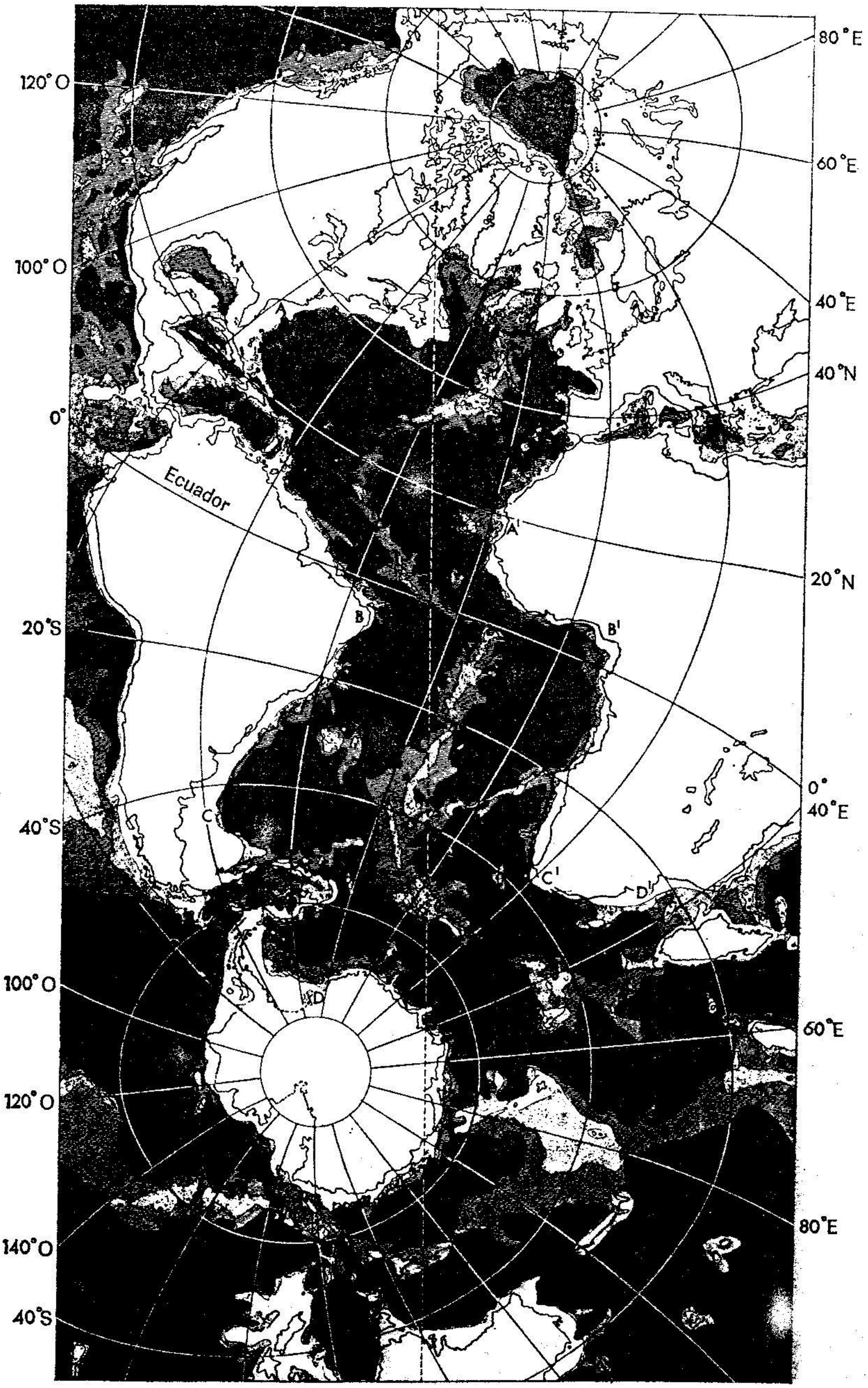


Figura 28.7. Mapa que ilustra el encaje morfológico de las tierras opuestas del Atlántico (*S. W. Carey*, 1958). Carey imaginó ambas Américas, la Antártida e incluso Australia como si hubieran girado como un todo, hacia Eurasia y África, alrededor de la charnela constituida en el sistema orogénico de Alaska, sugiriendo que este movimiento de 20 ó 30° habría cerrado los océanos Ártico, Atlántico y del sur. Propuso el término *oroclinal* para describir este tipo de sistema orogénico que parece haberse doblado o flexionado.

En 1965, Bullard, Everett y Smith publicaron un mapa del mejor «encaje» posible de los continentes que bordean el océano Atlántico (figura 28.8), construido con métodos aritméticos puramente objetivos. Desplaz[illegible] los continentes sobre la superficie terrestre valiéndose del teorema de Euler, de acuerdo con el cual una superficie esférica desplazada sobre una esfera puede ser trasladada a cualquier otra posición por una única rotación alrededor de un eje que pasa por el centro

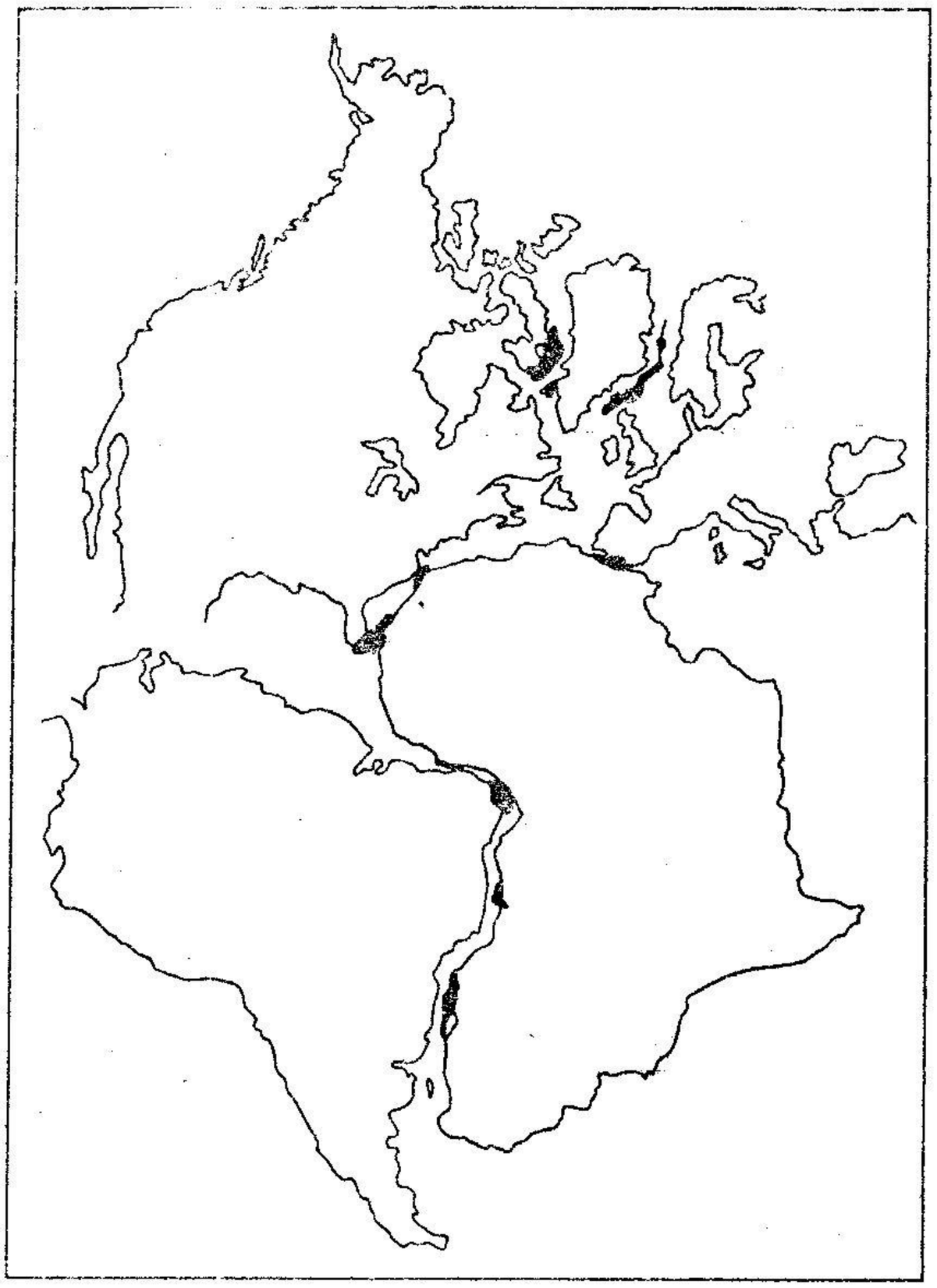


Figura 28.8. El mejor «encaje» de los continentes que bordean el Atlántico a la isóbata de 500 brazas (900 m). Las zonas negras indican superposición (*Según E. Bullard, J. E. Everett y A. G. Smith,* 1965).

de la esfera. El punto en el cual el eje corta la superficie de la esfera se conoce como centro o polo euleriano de rotación. En los cálculos, se consideró la tierra como esférica. El movimiento de una superficie de un elipsoide o geoide, como la tierra, sobre sí misma implica distorsión, pero como se calculó que esta distorsión era del orden de sólo 0,2 km, se consideró despreciable en comparación con los desajustes que había en el mapa de máximo «ajuste», figura 28.8.

Con la ayuda de un computador, Bullard, Everett y Smith encontraron el mejor «encaje» a 500 brazas, o sea a algo menos de 1000 m bajo el nivel del mar. El estrecho ajuste entre Sudamérica y África por un lado, y entre Norteamérica, Groenlandia y Europa por el otro, no sólo superó sus previsiones sino que además confirmó plenamente los resultados de los primeros ajustes de Carey.

Al hacer encajar los continentes que bordean el Atlántico, Bullard, Everett y Smith encontraron, igual que Carey anteriormente, que cuando África encajaba con Norteamérica se solapaba con España. Para que se consiga un encaje sin imbricación hay que hacer girar a España a la izquierda para cerrar el golfo de Vizcaya y llevar su costa norte a la cota de 500 brazas del oeste de Francia.

Analogías ecológicas entre los dos lados del Atlántico

Durante muchos años, el eminente geólogo sudafricano Alexander du Toit fue infatigable en la tarea de reunir evidencias en favor de la deriva de los continentes. En su conocida obra *Our Wandering Continents,* publicada en 1937, mostró que se pueden identificar una serie de correspondencias sorprendentes en los sedimentos, los fósiles, los climas, los movimientos terrestres y las intrusiones ígneas de ambos lados del Atlántico. La historia geológica de ambas regiones es esencialmente idéntica durante el Paleozoico y principios del Mesozoico, y las pruebas combinadas apuntan muy persuasivamente a la alta probabilidad de que estuvieran mucho más cerca que actualmente. Du Toit consideró posible que la distancia original entre las actuales costas opuestas hubiera sido tan pequeña como para ser sólo de 400 km. Pero éste era un cálculo mínimo. En 1961 H. Martin volvió a revisar el asunto, refiriéndose especialmente a Namibia (África sudoccidental) y a Brasil. Al discutir si el conocimiento más detallado actualmente disponible ha tendido a aumentar o a disminuir las semejanzas entre ambos lados del Atlántico, escribe: «No hay ninguna duda de que desde el Silúrico hasta el Cretácico cada corrección de la estratigrafía y de las columnas litológicas ha aumentado las semejanzas. Las columnas estratigráficas y litológicas de este período que abarca unos 200 millones de años han resultado ser casi idénticas. No creo que para un intervalo de tiempo tan largo se puedan encontrar parecidos tan notables entre partes de otros dos continentes».

Otra prueba igualmente sorprendente es el hecho, reconocido por datación radiométrica, de que a fines del Precámbrico y durante el Cámbrico un

ciclo orogénico largo y complejo alcanzó su fase terminal. Las líneas de dirección son subparalelas a las costas y están igualmente presentes a ambos lados del Atlántico Sur (fig. 31.6).

Mientras las glaciaciones carbonífero-pérmicas de Gondwanalandia siguen siendo la línea más convincente de evidencia geológica de la deriva continental (véanse las págs. 514-17), ahora puede añadirse a ellas el descubrimiento de la tillita de Iapo, al OSO de São Paulo, Brasil, ubicada en la misma posición estratigráfica que la tillita de Table Mountain, cerca de Ciudad del Cabo. Ambas son de fines del Silúrico o de principios del Devónico. Martin registró que tanto la dirección de movimiento del hielo cerca de Ciudad del Cabo como las direcciones de transporte de sedimentos devónicos a la cuenca del Paraná indican la existencia de zonas elevadas en regiones ahora ocupadas por el Atlántico Sur. También llamó la atención respecto al sorprendente contraste entre los depósitos glaciales de Table Mountain y del Brasil y los estratos de principios del Devónico de Australia, que contienen una fauna de aguas cálidas con corales. Este contraste climático había desaparecido a fines del Carbonífero, cuando Australia sufrió una glaciación análoga a la de los demás continentes australes.

También debe añadirse que los indicios muy difundidos de glaciaciones de fines del Precámbrico (de hace unos 650 ± 50 millones de años) de la parte sur de África (Katanga, Bajo Zaire y Namibia) se han podido encajar con el descubrimiento de depósitos similares en Lavras (Brasil), cuya edad está comprendida entre los límites de unos 600 y 800 millones de años. Es probable, aunque no está del todo comprobado, que todos ellos se correspondan aproximadamente con las tillitas esturtienses de Australia del sur y central (véase la página 519) y la figura 21.25), con otras correlacionadas con ellas de Tasmania y de Australia del Norte.

Entre una multitud de semejanzas, demasiado numerosas para que las podamos mencionar, se debe llamar la atención respecto a las grandes coladas de basalto que inundaron los desiertos triásicos de ambos continentes a principios del Jurásico. En la cuenca del Paraná los basaltos cubren una extensión de un millón o más de km² y alcanzan un espesor de 1,5 km. En África del Sur ahora sólo queda una pequeña extensión de basaltos, pero originariamente, a juzgar por los enjambres de diques y mantos interestratificados entrecruzados en la cuenca de Karroo y por el enorme espesor de las coladas todavía conservadas en el lado oriental desde Drakensberg al Lebombo, el volumen de lava arrojada aquí debió ser aún mayor que en Sudamérica. Tales signos espectaculares de actividad extraordinaria en las zonas profundas parecería ser una preparación significativa hacia la importante fragmentación de Gondwanalandia y la aparición de pasadizos marinos entre las tierras en proceso de separación. La evidencia paleomagnética basada en estas rocas basálticas indica que la separación de África y Sudamérica empezó cuando se estaba produciendo esta actividad ígnea. Pero hasta ahora no se han detectado pruebas reales de la existencia del Atlántico Sur antes del Cretácico inferior. Hay capas marinas de esta edad en los campos petrolíferos de Jurásico continental de Luanda, Angola y de Bahía, Brasil.

La existencia de huesos de un pequeño reptil de agua entre dulce y salobre, llamado *Mesosaurus,* en una banda de arcilla deltaica lacustre situada cerca de la parte superior del Carbonífero constituye una prueba paleontológica de la antigua unión de Sudamérica y África. El hecho de que en ninguna otra parte del mundo se hayan encontrado restos de este pequeño animal, de unos 45 cm de longitud, sugiere que Sudamérica y África estaban unidas a fines del Paleozoico.

Uno de los primeros indicios de que durante el Paleozoico no existía el Atlántico Norte fue la constatación de que tanto en Escocia como en Newfoundland hay fósiles similares, incluido el trilobites cámbrico *Olenellus.* Además, los trilobites del Cámbrico medio de Suecia son los mismos que los de Utah. Esta evidencia implica la existencia previa de aguas someras entre ambos continentes, como las que habría en el geosinclinal caledoniano. Cuando se ponen juntas Norteamérica y Europa de modo que coinciden sus polos paleomagnéticos pérmicos y que sus correspondientes isoclinas, incluyendo el ecuador, quedan formando una línea continua, como se indica en la figura 28.9, los frentes caledonianos de Groenlandia y los Highlands noroccidentales, así como el frente correspondiente de los Apalaches, quedan automáticamente unidos casi igual como cuando

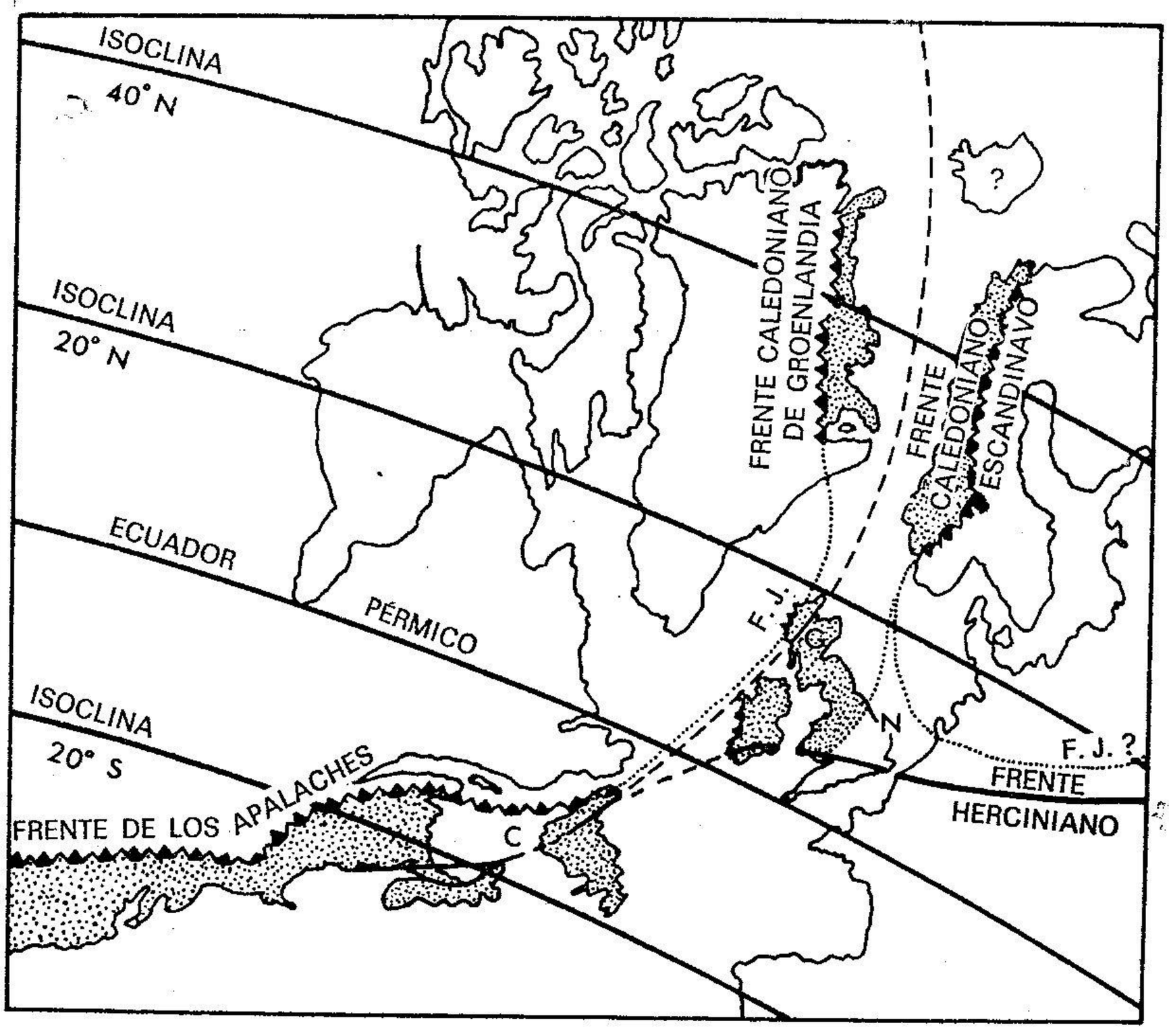


Figura 28.9. Reconstrucción tentativa de las tierras opuestas del Atlántico Norte, basada principalmente en el desplazamiento de Europa y Norteamérica de modo que, tal como se indica, las posiciones medias de sus polos pérmicos caledoniano y apalache están sombreados, F. C., frente caledoniano de los Highlands noroccidentales de Escocia; G, falla de Great Glen de Escocia; C, falla de Cabot de Newfoundland y Nueva Escocia y su probable prolongación a lo largo de la costa de Nueva Inglaterra; N, posible zona intermedia (incluyendo parte del mar del Norte, de East Anglia y de los Países Bajos) si el frente caledoniano escandinavo debiera continuar por Brabante y Polonia.

se buscaba el encaje más probable antes de que se dispusiera de datos paleomagnéticos que pudieran servir de guía. Además, la convergencia occidental a través de Europa de los frentes externos caledoniano y herciniano, hasta casi encontrarse en el sudoeste de Irlanda, se continúa en Norteamérica, donde los frentes llegan a cruzarse. La datación radiométrica ha demostrado que gran parte de la zona norte de los Apalaches fue afectada por la orogénesis que en Europa se llamaría herciniana o varisca. Tuzo Wilson ha sugerido que la falla de Great Glen tiene su prolongación natural en la falla de Cabot, y de nuevo se encuentra que esta correlación concuerda con el reensamblaje paleomagnético de la figura 28.9. Tanto en Escocia como en Newfoundland hay centros volcánicos similares asociados con enjambres de diques y complejos granodioríticos del Devónico inferior, como el Ben Nevis; y el tipo de Devónico representado por la Arenisca Roja Antigua tan característico de Escocia y del resto de la parte caledoniana de Gran Bretaña e Irlanda, también se encuentra en Noruega, Groenlandia y Spitzbergen, así como en algunas partes del este de Norteamérica.

Intentos de reconstrucción de Gondwanalandia

A du Toit, como a Taylor, le pareció más lógico suponer que durante el Paleozoico había dos masas de tierra y no una sola, el *Pangea,* imaginada por Wegener. Sea como sea, antes de la orogenia terciaria Alpes-Himalaya, Laurasia y Gondwanalandia estaban separadas entre sí por un largo canal marítimo al cual Suess llamó el Tethys. El Tethys, flanqueado por Eurasia e Indo-África, estaba bordeado por varios geosinclinales, y quizá localmente él mismo estaba formado por ellos, de los cuales se originó el sistema montañoso Alpes-Himalaya.

La reconstrucción de Laurasia, tal como se ha discutido en las páginas anteriores, consistiría principalmente en el cierre del Atlántico. La reconstrucción de Gondwanalandia es más difícil en muchos aspectos. Se han hecho muchos intentos utilizando todas las evidencias geológicas y la mayoría de los resultados tienen un notable aire de familia. Los mayores desacuerdos se refieren a las posiciones de la India y de Madagascar. La capa guijarrosa de Talchir indica que durante el Carboní-

fero-Pérmico la India debía estar lejos del ecuador. Du Toit (1937) la unió entre África y la Antártida, y muchos otros le siguieron. Sin embargo, en 1961, Ahmad estableció un buen «encaje» pérmico entre la India y Australia occidental que fue adoptado por Krishna (1969). Entre las múltiples semejanzas, un detalle digno de ser destacado es la existencia de cuatro capas delgadas de caliza, formadas casi exclusivamente de conchas de *Productidos,* en Umari (exactamente encima de las capas de Talchir). En la costa occidental de Australia hay una densa acumulación de fósiles del mismo grupo en las calidas correspondientes. Probablemente los efectos de terremotes violentos destruyeron colonias muy pobladas de estos organismos. La misma reconstrucción también pone en contacto las formaciones precámbricas de hierro bandeado de Yampi Sound, Australia, con otras similares de Singhbhum y Bastar, de la India, ambas con edades radiométricas de entre 2000 y 2200 millones de años. El sistema orogénico de Dharwar, de la India, con sus famosas minas de oro de Kolar, también queda casi paralelo a la faja aurífera de Kalgoorlie, de Australia occidental. En ambas regiones el oro se introdujo hace unos 2400 millones de años.

Petrascheck (1973) ha llamado la atención respecto a la provincia mineral precámbrica de África, sur de la India y Australia occidental, que se unen formando una provincia cuando Australia, la India y África se hacen encajar como en la figura 28.10. Petrascheck sugiere que la provincia mineral de Madagascar encaja mejor en este conjunto si se ubica frente al sudeste de África que frente a Kenia, como suele representarse. Otra provincia mineral de Gondwanalandia se extiende entre Sudamérica y África occidental (Petrascheck, 1973).

Las figuras 28.11 y 28.12 presentan algunos ejemplos de Gondwanalandia basados en pruebas geológicas. En general en estas reconstrucciones ha surgido la dificultad de que algún elemento de evidencia aparentemente favorable se ha tenido que sacrificar para que se lograra un «encaje» razonable de todas las otras partes.

La figura 28.11 (*a*) fue un esforzado intento de du Toit (1937) basado en su idea de que los pliegues del Cabo de Sudáfrica se prolongaban hacia Sudamérica por un lado, y por el otro, hacia Australia. A esta faja la llamó el geosinclinal Samfrau.

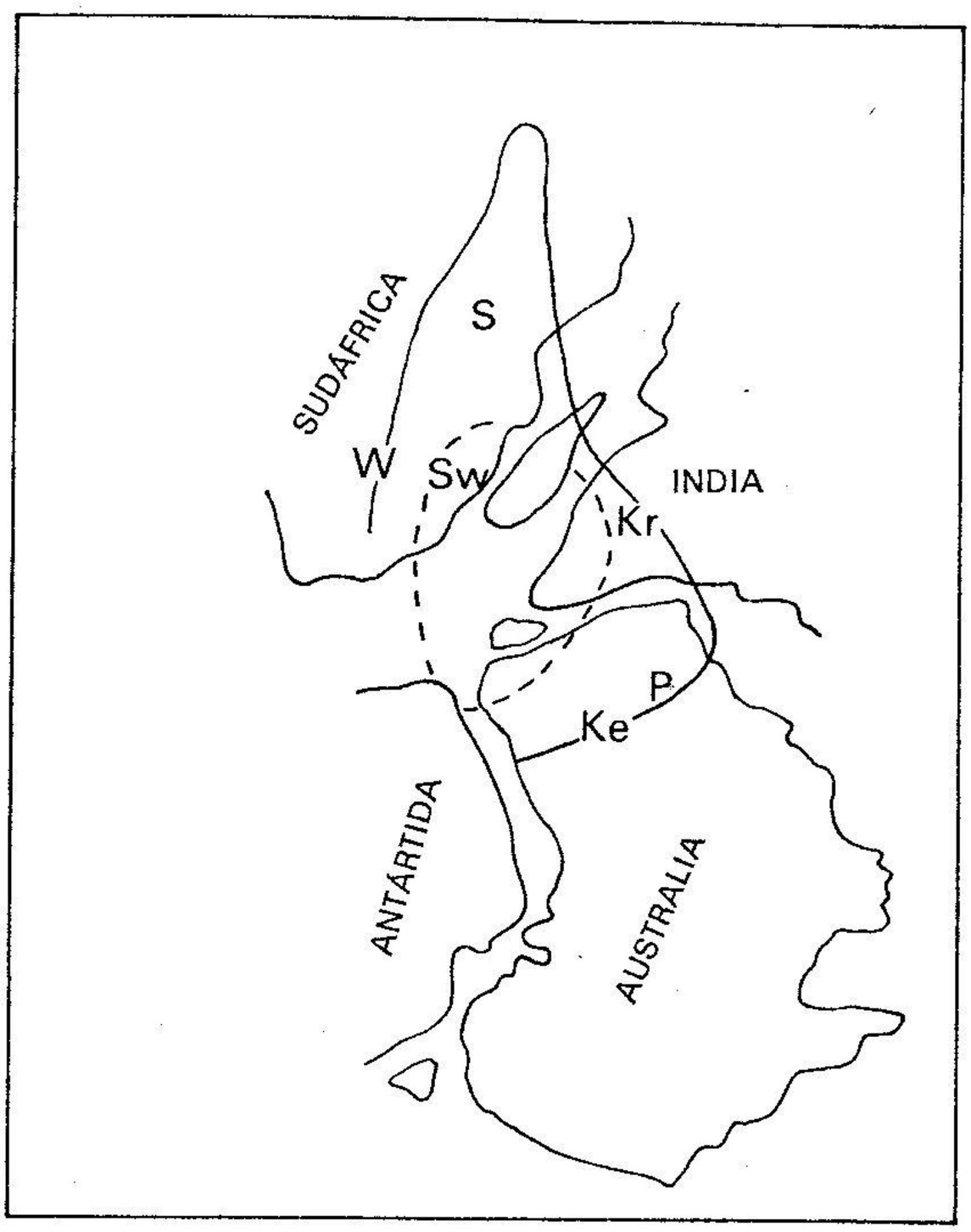
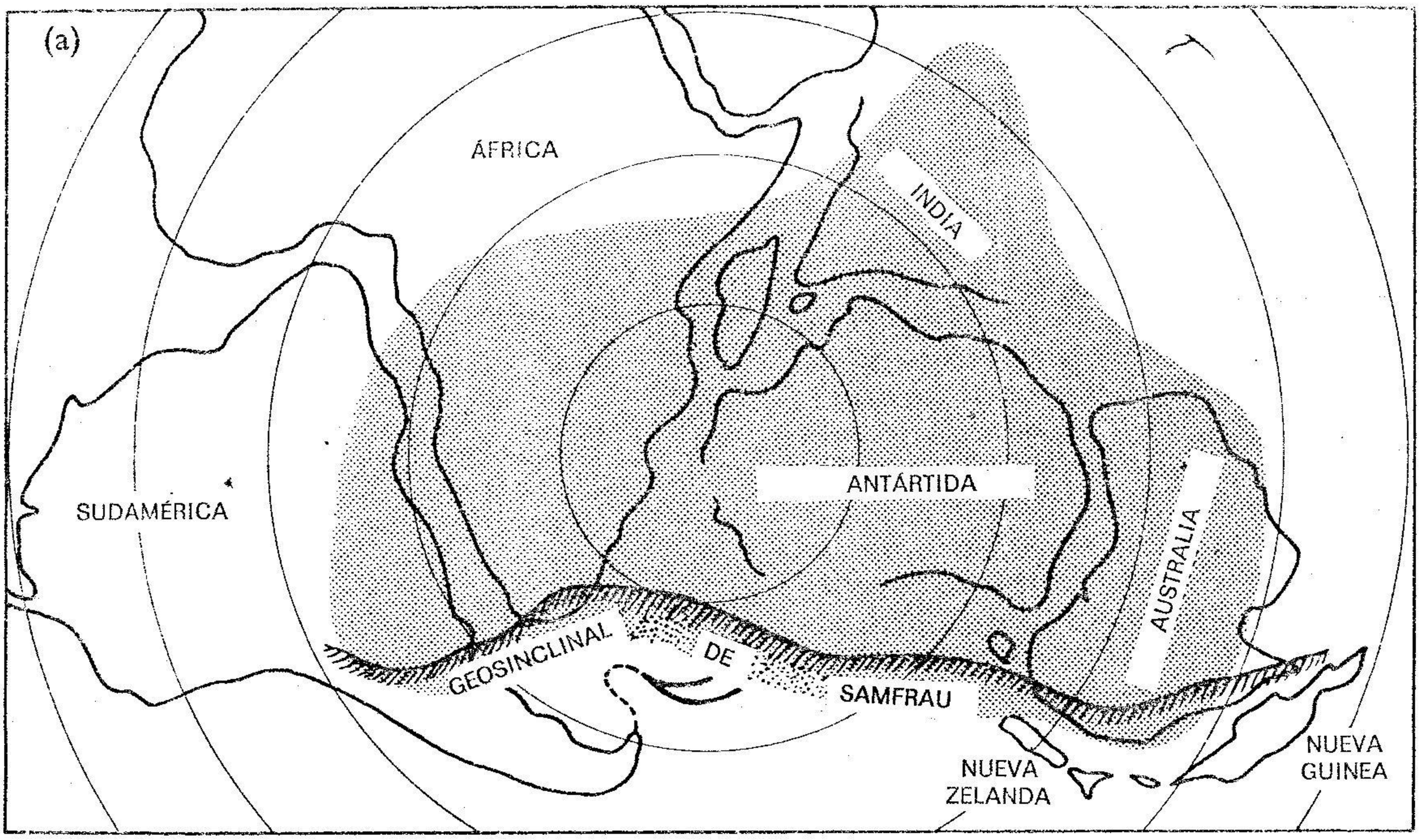


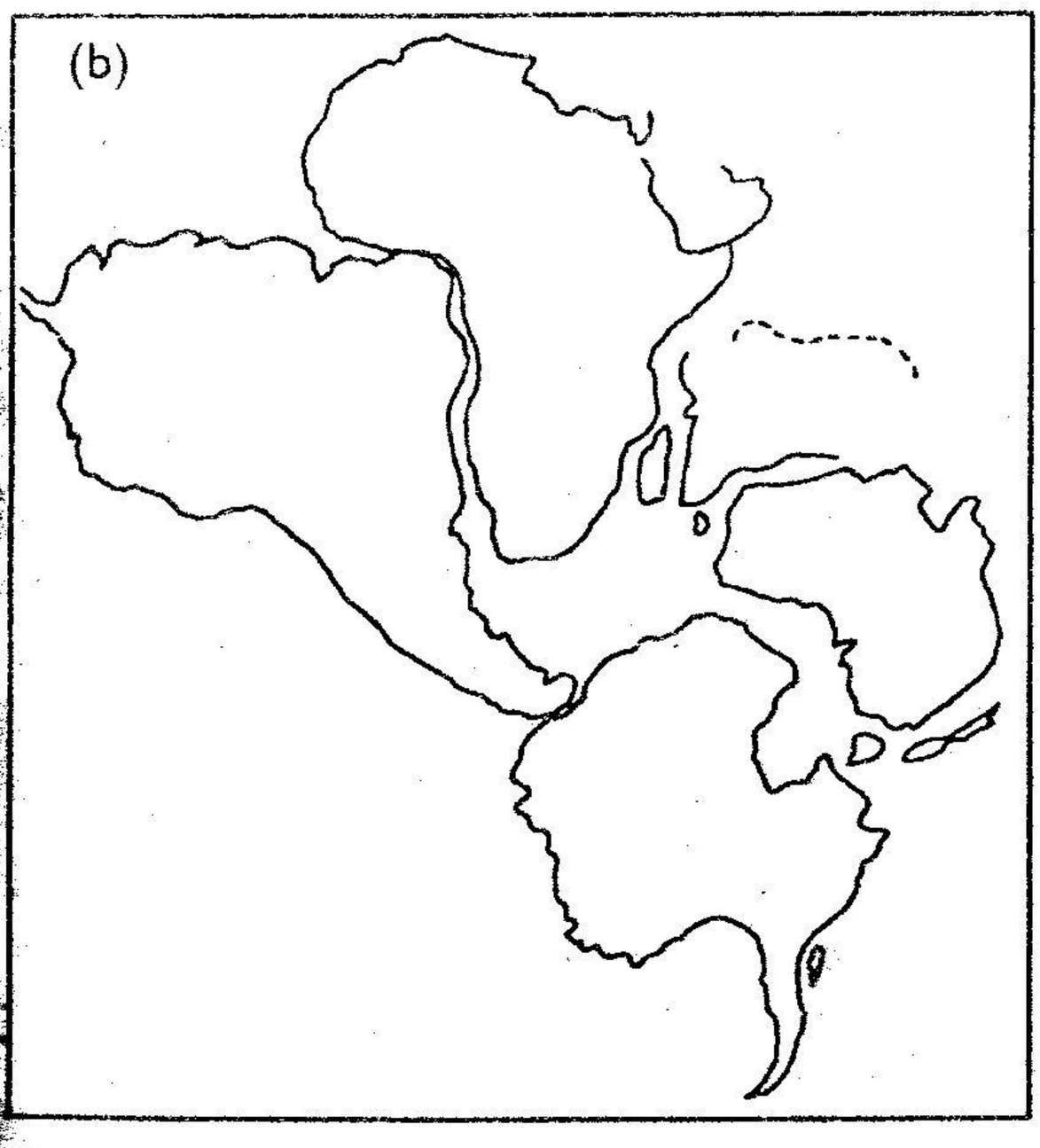
Figura 28.10. «Encaje» de las provincias minerales de Sudáfrica, Madagascar, La India y Australia. La línea de trazos señala una provincia pegmatítica (de 600 a 1000 millones de años de antigüedad) caracterizada por niobio, tántalo, berilo, zircón, algo de estaño y uranio. La línea continua rodea la provincia aurífera, más antigua, de Kolar (Kr) de la India, Kalgoorlie (Ke) y Pilbara (P) de Australia, y de Witwatersrand (W), Swaziland (Sw) y Salisbury (S) del sudeste de África. Las provincias minerales de Madagascar encajan con esta provincia cuando Madagascar se sitúa frente al sudeste de África como en la figura 28.12 (*b*) y (*c*). (*Según W. E. Petrascheck,* 1973).

Du Toit no conocía la ligazón indoaustraliana, y tuvo que hacer un verdadero sacrificio postulando la poco natural separación de la Tierra de Graham de la masa principal de la Antártida. Es interesante hacer resaltar el hecho de que las investigaciones más recientes realizadas en la Antártida han justificado la sospecha de du Toit de que algún día este continente proporcionaría pruebas de una glaciación carbonífero-pérmica.

Du Toit hizo dos suposiciones que actualmente son de interés:

(*a*) En los valles de fractura de África, en el mar Rojo y en la fosa tectónica del Rin vio repre-





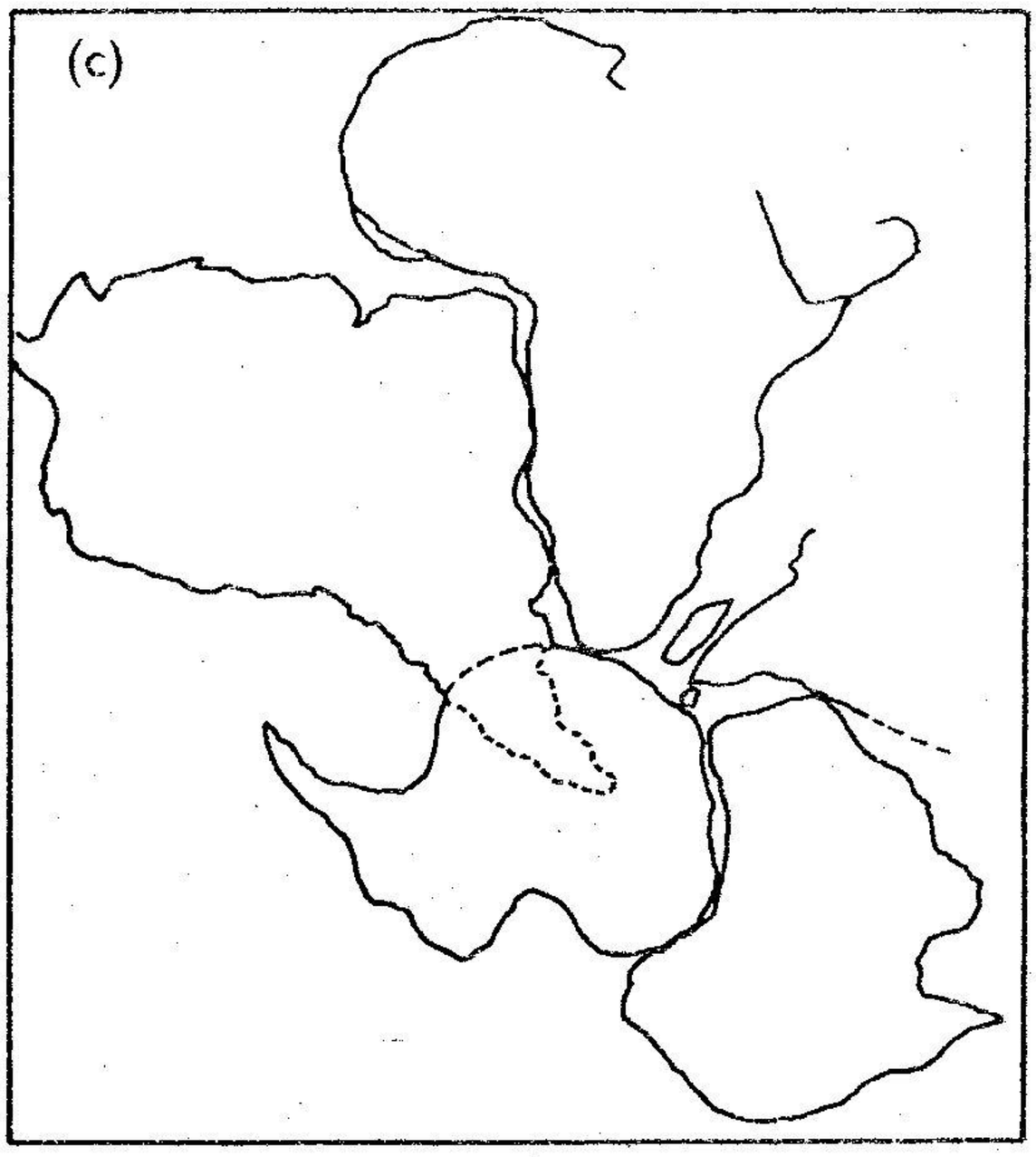


Figura 28.11. Mapa esquemático que ilustra distintos intentos de reconstrucción del Gondwana en el Carbonífero-Pérmico en base a evidencias geológicas.
(*a*) A. L. du Toit (1937)
(*b*) S. W. Carey (1958)
(*c*) J. T. Wilson (1963)

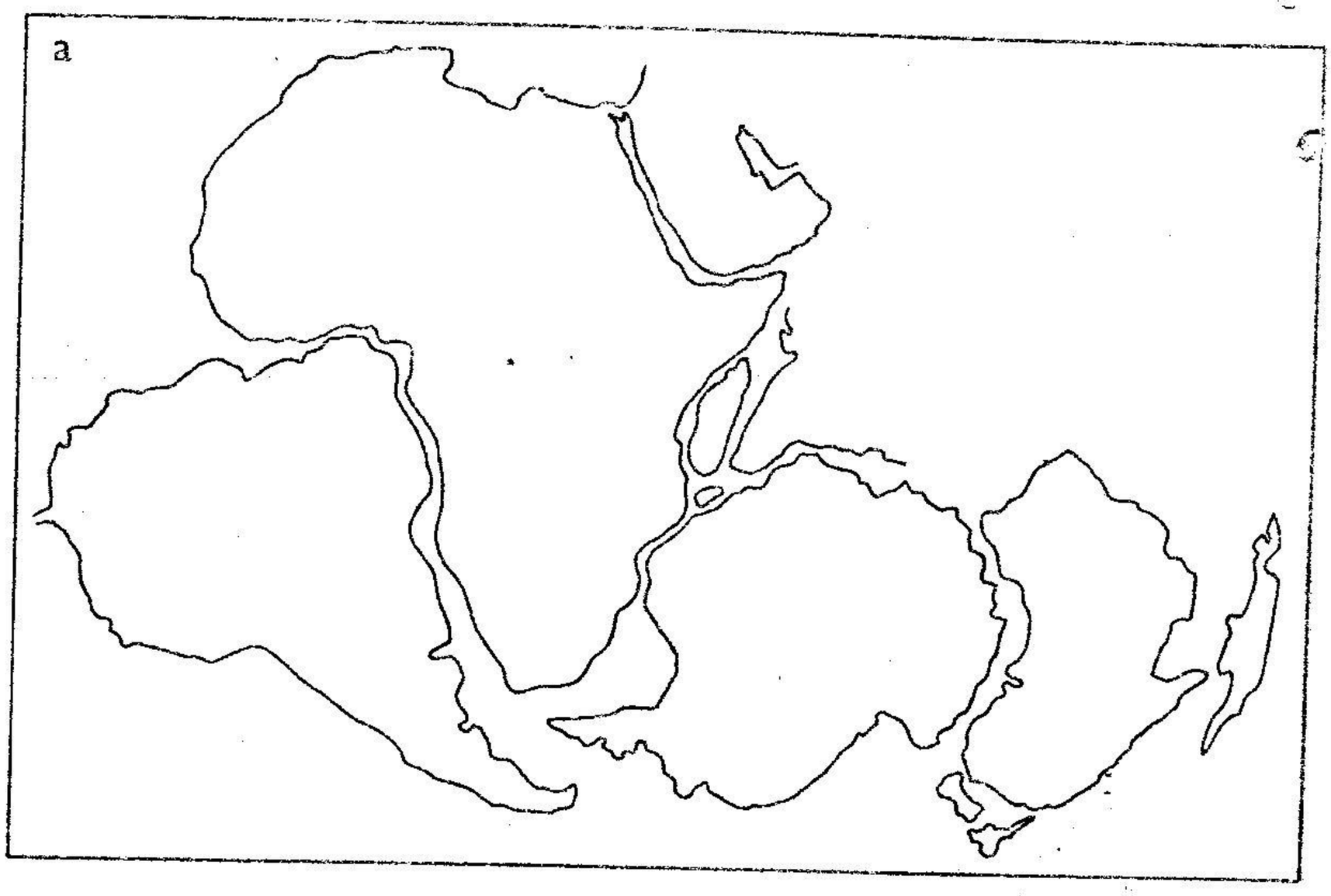


Figura 28.12. Intentos más recientes de reconstrucción del Gondwana: (*a*) A. G. [illegible] y A. Hallam (1970). El mejor «encaje», calculado por computador para Gondwanalandia, a 500 brazas (900 m) y con base en las pruebas geológicas. (b) Lester King (1973). Reconstrucción basada en pruebas geológicas. (c) D. H. Tarling (1973). Reconstrucción geométrica confrontada y probada con evidencias paleomagnéticas.

sentados estadios iniciales de la separación de masas continentales. También comparó los bordes en escarpe de los bloques basculados que bordean estos valles de fractura con los escarpes, que parecen de falla, que constituyen las orillas de continentes tales como África y Sudamérica, separados por fracturación. Además, estas costas de tipo escarpe, suavemente basculadas hacia tierra, le sirvieron a du Toit como explicación para los ríos que, naciendo tan cerca de estas costas tan altas, fluyen hacia tierra, a veces perpendicularmente al continente, antes de llegar al mar. Entre otros citó los ejemplos de Sudáfrica, de los ríos Orange y Limpopo, y, más al norte, del Congo, actualmente el Zaire. Análogamente, los ríos Paraná, Uruguay y San Francisco de Sudamérica nacen cerca de la costa y fluyen a través de largas distancias paralelamente a la costa antes de llegar al mar.

(*b*) Du Toit, en su reconstrucción de Gondwanalandia, dejó espacios entre los continentes actuales. Al hacerlo se guiaba en facies sedimentarias. Por ejemplo, al comparar las cadenas montañosas del Cabo de Sudáfrica con la Sierra de la Ventana, Argentina, llegó a la conclusión de que la variación lateral de los sedimentos paleozoicos y sus estructuras requería que hubieran estado separadas unas de otras por una distancia de 500 a 600 km. Comprobó esta distancia por las intersecciones de otras líneas de evidencia e imaginó que el hueco debió de estar ocupado por tierra por lo menos durante el Jurásico. Du Toit imaginó, sin embargo, que en algún momento dado y por una entrada del mar, la fosa entre Sudamérica y África se convirtió en el proto-Atlántico Sur.

La figura 28.11 (*b*) es una reconstrucción de Warren Carey (1958) de Gondwanalandia. Aquí se adopta la unión indo-australiana de Ahmad, pero la Antártida encaja mal y de nuevo la Tierra de Graham vuelve a ser desplazada de forma poco natural.

La figura 28.11 (*c*) es una reconstrucción de Tuzo Wilson (1963). Adopta la unión indo-australiana y usa las dorsales mesoceánicas como guía. Pero así no queda sitio para la Antártida; por consiguiente, se rompe la regla que prohibía la imbricación.

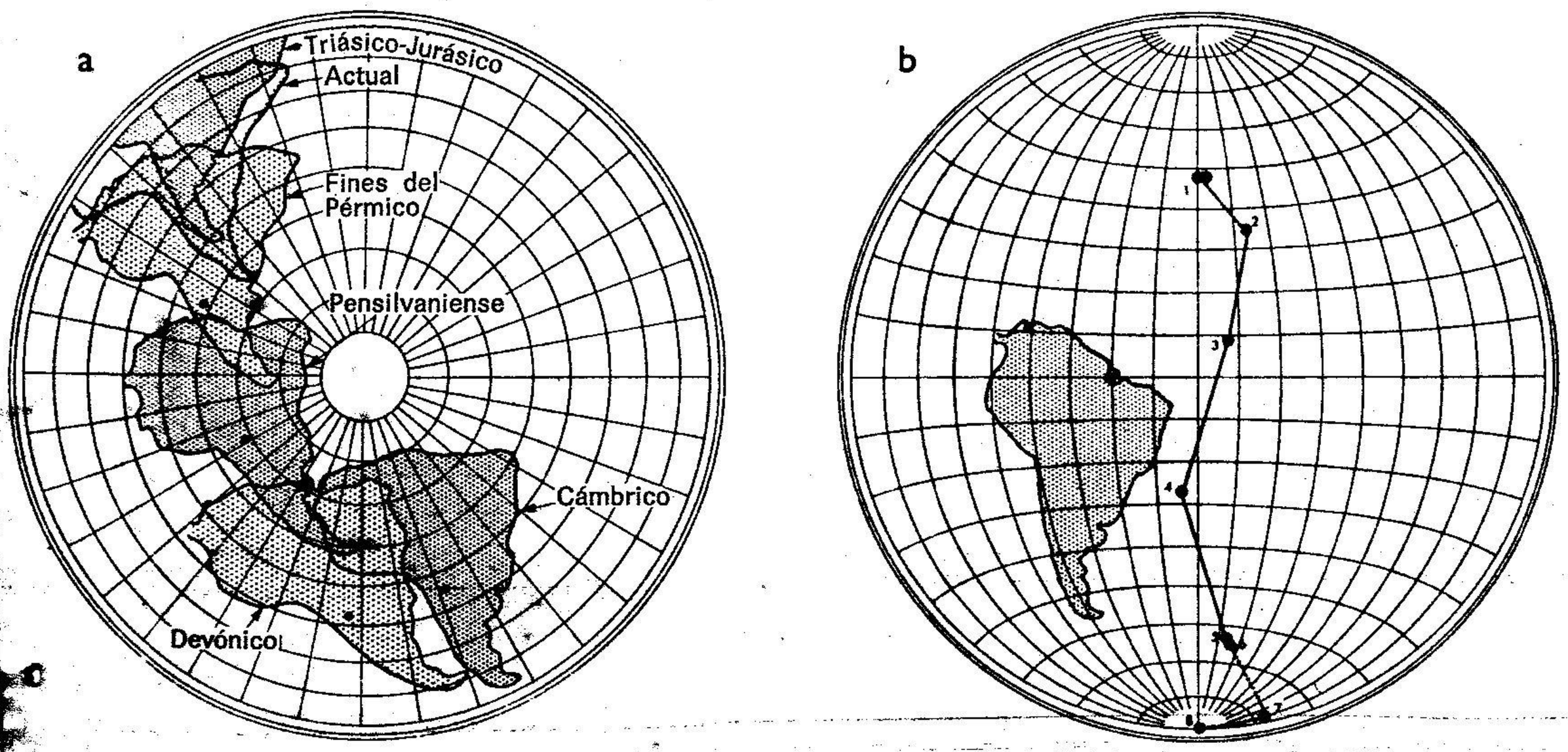
La figura 28.12 (*a*) es una reconstrucción de Smith y Hallam (1970). Con la ayuda de un computador encontraron el mejor «encaje» para Gondwanalandia a 500 brazas (900 m) utilizando sólo los encajes que consideraron geológicamente viables. Les salió como geométricamente bueno el «encaje» de Ahmad de la India con el noroeste de Australia, pero lo descartaron porque la India-Australia-Antártida no podían encajar bien con África sin que quedaran en medio grandes huecos. Por las pruebas estratigráficas, consideraron que estos huecos no existían.

La figura 28.12 (*b*) es una reconstrucción de Lester King (1973) que representa Gondwanalandia como «un simple cuerpo ovoide rodeado por una guirnalda de cadenas montañosas tectónicas». King adopta la unión de Ahmad indo-australiana y encuentra pruebas que lo inducen a ello en el hecho de que esta reconstrucción presenta continuidad entre las fajas orogénicas terciarias del Himalaya y las de Nueva Guinea. Por razones geológicas, King incluye el bloque Irán-Afganistán en Gondwanalandia, llenando así el espacio al que se referían Smith y Hallam cuando se adopta la unión indo-australiana. King sitúa Madagascar frente al sudeste de África, a diferencia de las reconstrucciones de du Toit y de Smith y Hallam. En base a evidencias geológicas, Kent (1972, 1973) y Tarling (1973) están de acuerdo en que en los tiempos del Gondwana Madagascar estaba situada en la región mozambiqueña del sudeste de África.

Comprobación de la reconstrucción del Pangea por referencias a las posiciones de los polos paleomagnéticos

Creer (1965) calculó las posiciones de los polos paleomagnéticos para varios períodos geológicos a partir de datos paleomagnéticos fiables de la época y mostró que es posible descubrir si ha habido o no movimiento entre dos continentes comparando sus curvas de «migración polar». Si las curvas

Figura 28.13. (*a*) Paleolatitudes y orientaciones de Sudamérica para los períodos comprendidos entre principios del Paleozoico y principios del Mesozoico, construidas a partir de datos paleomagnéticos. (*b*) Datos paleomagnéticos expresados en forma de curva de migración polar para el polo sur, con la posición de Sudamérica fijada, para el Paleozoico (*K. M. Greer,* 1965).



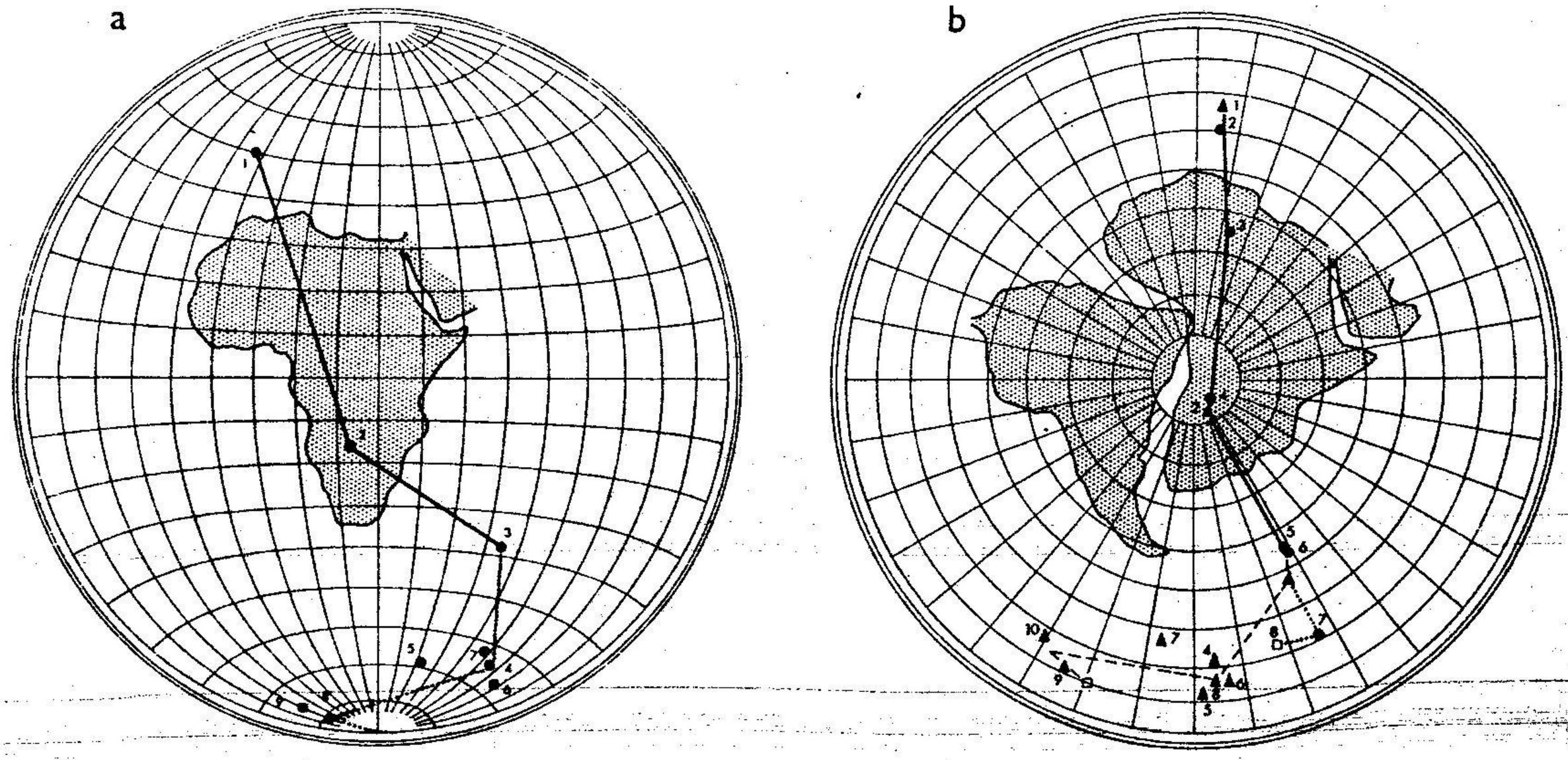
tienen la misma for o sea que se pueden superponer una a otra, entonces es que no ha habido movimiento relativo.

A partir de datos paleomagnéticos bien establecidos de Sudamérica, y eligiendo una secuencia de longitudes relacionadas, Creer encontró pruebas del movimiento de este continente a través del polo sur durante el Paleozoico y principios del Mesozoico (fig. 28.13 (*a*)). Este resultado también puede expresarse como una curva de «migración polar» (fig. 28.13 (*b*)). Análogamente, Creer construyó una curva de «migración polar» para África, y encontró que las artes paleozoicas de las curvas de «migración polar» para Sudamérica y África se pueden superponer, y que al mismo tiempo ambos continentes estaban encajados uno con otro, lo que indica que en esta era no hubo movimiento relativo entre ambos (fig. 28.14). Además, para la era paleozoica, la curva de «migración polar» para Australia se puede superponer a la de Sudamérica y África, lo que indica que no hubo movimiento relativo entre estos tres continentes durante esta era, y que sus posiciones relativas eran aproximadamente las que se indican en la figura 28.15.

Más recientemente Creer (1973) ha situado las posiciones de los polos paleomagnéticos en un mapa del *Pangea* para los períodos Cámbrico al Cretácico inclusive. La forma concreta comprobada del *Pangea* está compuesta por un Laurasia reconstruido cerrando el Atlántico de acuerdo con Bullard *et al.*, y un Gondwana de acuerdo con Smith y Hallam. Encontró que los polos para el período ordovícico estaban tan dispersos que no podían concordar con la existencia en este tiempo del *Pangea*. El ordenamiento de los polos en una nube para la época que comprende desde el Carbonífero inferior al Jurásico indica la existencia de un *Pangea* de forma muy similar a la sometida a comprobación. Para el Cretácico los polos están más dispersos, lo que indica la rotura del *Pangea* en este período. Un punto de interés es que la posición del polo para Madagascar durante el Cretácico que encontró Creer sugiere que en la reconstrucción de Smith-Hallam Madagascar está incorrectamente ubicada.

En 1972, Tarling hizo una nueva construcción geométrica de Gondwanalandia, que difiere de la de Smith y Hallam en que situó Madagascar junto a Mozambique, y la India junto a Madagascar (fig. 28.12 (*c*)). Ubicó Australia junto a la Antártida como en la reconstrucción de Smith y Hallam, pero a ambas las emplazó más al sur en relación

Figura 28.14. (*a*) Curva de migración polar del polo sur, relativa a una África fija, construida a partir de datos paleomagnéticos derivados de rocas africanas. (*b*) El hecho de que las partes paleozoicas de las curvas de migración polar de Sudamérica y África tengan la misma forma y puedan superponerse indica que no hubo movimiento relativo entre ambos continentes durante este tiempo (*K. M. Greer,* 1965).



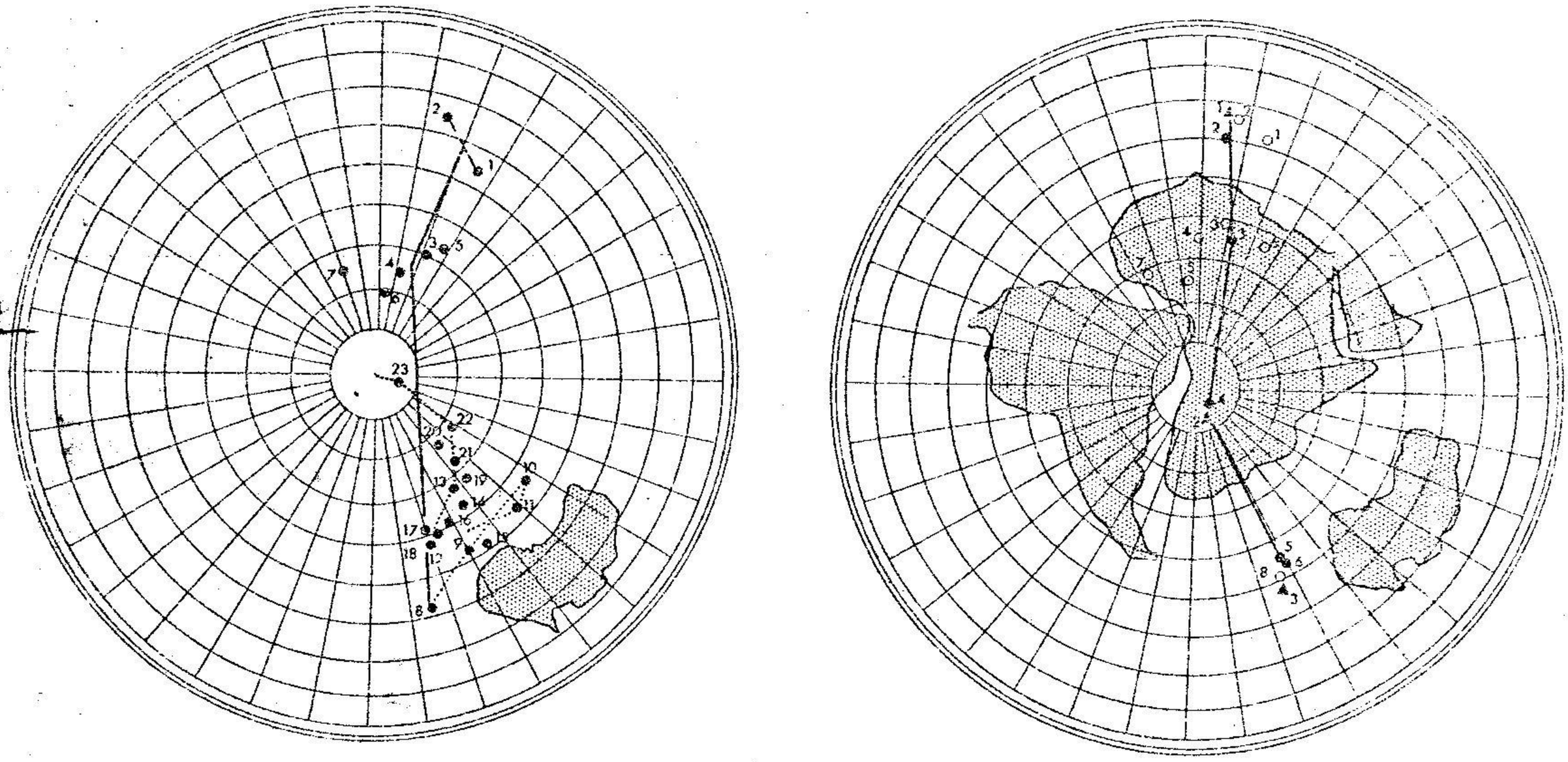


Figura 28.15. Posiciones relativas de Sudamérica, África y Australia durante el Paleozoico, determinadas por la superposición de sus curvas de migración polar correspondientes a esta época (*K. M. Greer,* 1965).

a África. Entonces Tarling comprobó este nuevo «encaje» con los datos paleomagnéticos más fiables disponibles. Encontró que para el Mesozoico la dispersión de polos paleomagnéticos resultaba menor que la que salía con la reconstrucción de Smith y Hallam.

De todo lo dicho sobre las pruebas se ve que todavía no existe una única construcción del *Pangea,* y ni siquiera de Gondwanalandia, aceptable para todos los científicos. No obstante, la evidencia paleomagnética prueba que el *Pangea* de algún modo existió a fines del Paleozoico.

Referencias seleccionadas

Ahmad, F., 1961, 'Palaeogeography of the Gondwana Period in Gondwanaland, with special reference to India and Australia, and its bearing on the theory of continental drift', *Memoirs of the Geological Survey of India*, vol. 90, pp. 142.

Bullard, E. C., Everett, J. E., and Smith, A. C., 1965, 'The fit of the continents around the Atlantic', *Philosophical Transactions of the Royal Society*, vol. 258, pp. 41–51.

Carey, S. W., 1958, *Continental Drift : A Symposium*, Geology Department, University of Tasmania, pp. 177–355.

Creer, K. M., 1965, 'A Symposium on continental drift: III, Palaeomagnetic Data from the Gondwanic Continents', *Philosophical Transactions of the Royal Society*, vol. 258, pp. 27–40.

— 1973, 'On the arrangement of the landmasses and the configuration of the geomagnetic field during the Phanerozoic', in *Implications of Continental Drift to the Earth Sciences*, vol. I, edited by D. H. Tarling and S. K. Runcorn, Academic Press, London and New York, pp. 47–76.

Du Toit, A. L., 1937, *Our Wandering Continents*, Oliver and Boyd, Edinburgh.

Kent, P. E., 1973, 'East African evidence of the Palaeoposition of Madagascar', in *Implications of Continental Drift to the Earth Sciences*, vol. 2, edited by D. H. Tarling and S. K. Runcorn, Academic Press, London and New York, pp. 873–5.

King, L. C., 1973, 'An improved reconstruction of Gondwanaland', in *Implications of Continental Drift to the Earth Sciences*, vol. 2, edited by D. H. Tarling and S. K. Runcorn, Academic Press, London and New York, pp. 873–5.

— 1973, 'An impr[illegible]d reconstruction of Gondwanaland', in *Implications of Continental Drift to the Earth Sciences*, vol. 2, edited by D. H. Tarling and S. K. Runcorn, Academic Press, London and New York, pp. 851–63.
KRISHNAN, M. S., 1967, 'Continental Drift', *Journal of the Indian Geophysical Union*, vol. VI, pp. 1–34.
MARTIN, H., 1961, 'The hypothesis of continental drift in the light of recent advances of geological knowledge in Brazil and in South-West Africa', Alexander L. du Toit Lecture, No. 7, *Transactions of the Geological Society of South Africa*, Annexure to vol. 64, pp. 1–47.
SMITH, A. G., and HALLAM, A., 1970, 'The fit of the southern continents', *Nature*, vol. 225, pp. 139–44.
TARLING, D. H., 1972, 'Another Gondwanaland', *Nature*, vol. 238, pp. 92–3.
— 1973, 'Comments on "East African Evidence by P. E. Kent"' pp. 876–7.
TAYLOR, F. B., 1910, 'Bearing of the Tertiary mountain belt on the origin of the earth's plan', *Bulletin of the Geological Society of America*, vol. 21, pp. 179–226.
VAN DER GRACH, *et al.*, 1928, *Theory of Continental Drift : A Symposium*, The American Association of Petroleum Geologists.
WEGENER, A., 1912, 'Die Entstehung der Kontinente', *Petermann's Mitteilungen*, pp. 185–95, 253–6, 305–9.
— 1966, *The Origin of Continents and Oceans*, 1929, J. Birman, Methuen, London.
WILSON, J. T., 1963, 'Continental drift', *Scientific American*, vol. 208, pp. 86–100.